

И. Я. РАЙКОВ

ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания»



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1975

6П2.24

P18

УДК 621.43:629.113/114 (075.8)

Рецензенты:

Кафедра автотракторных двигателей Московского автомобильно-
дорожного института
Проф. *Мозохин Н. Г.*

Райков И. Я.

P18 Испытания двигателей внутреннего сгорания. Учебник
для вузов. М., «Высш. школа», 1975.

320 с. с ил.

В книге изложены основы теории и практики испытания современных автомобильных и тракторных двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрены назначение и виды испытаний, методы их проведения и обработки материалов с учетом соответствующих ГОСТов. Уделено внимание методике обработки индикаторных диаграмм на электронных вычислительных машинах (ЭВМ) и вопросу сопоставления испытаний при частичных нагрузках.

Рассмотрены различные электронные и обычные испытательные устройства и приборы, применяемые в лабораториях двигателей, а также методы снятия основных характеристик, включая определение шума, токсичности и дымности двигателей. Приведены краткие сведения о лабораториях, об измерениях, измерительных приборах, ошибках измерений и способах математической их обработки.

Книга предназначена для студентов вузов и может быть полезной для инженеров-испытателей.

Р 30305—034 155—75
001 (01)—75

6П2.24

© Издательство «Высшая школа» 1975 г.

Расширение производства автомобилей и тракторов и всевозрастающая их роль в удовлетворении потребностей современного общества побуждают непрерывно совершенствовать силовые агрегаты этих машин — поршневые, роторные, газотурбинные и иные двигатели транспортного типа.

За последние годы резко возросли литровая мощность и экономичность поршневых двигателей, до десятых долей килограмма снизился, например, удельный вес автомобильных двигателей, улучшились и другие оценочные показатели этих двигателей. Тем не менее стремление повысить эффективность современных автомобилей и тракторов, снизить токсичность отработавших газов и улучшить основные эксплуатационные свойства машин требует дальнейшего совершенствования существующих поршневых двигателей.

Вполне очевидно, что на достигнутом уровне технического прогресса развитие и совершенствование любых двигателей немыслимо без целеустремленной и согласованной работы конструкторов, технологов и испытателей. Роль последних приобрела особую значимость, так как оценка конструкции, определение ее соответствия технологическим и общим требованиям времени в конечном итоге принадлежит испытателям.

Одновременно с развитием двигателей непрерывно также обновляются как методы, так и технику испытаний. Широкое применение находят электронные приборы, счетно-решающие устройства и различные автоматы, уменьшающие затраты времени на проведение испытаний и на обработку получаемых результатов. В настоящее время исключительное внимание уделяют исследованиям рабочих процессов двигателей, тепловой напряженности основных деталей и токсичности отработавших газов в связи с форсированием двигателей и возрастающим загрязнением атмосферы токсичными веществами отработавших газов. Ранее исследования этих газов проводились с другой, более узкой, целью изучения совершенства протекания рабочих процессов в двигателях.

Настоящий курс содержит основные сведения по организации испытаний, теории и практике измерений, выбору современных приборов и устройств, методов испытания двигателей и систем с учетом рекомендаций ГОСТ 18508—73 и 18509—73 для тракторных и ГОСТ 14846—69 для автомобильных двигателей *. Изложение и подбор материала ограничены объемом книги, но полностью соответствуют

* ГОСТ 14846—69 введен с 1/VII 1970 г. ГОСТ 18508—73 и 18509—73 введены на срок с 1/I 1975 г. до 1/I 1980 г.

программе курса «Испытания двигателей внутреннего сгорания» для высших учебных заведений по специальности 0523, утвержденной Министерством высшего и среднего специального образования СССР для специализации «Автомобильные и тракторные двигатели».

В связи с тем что существующие и выпускаемые измерительные приборы, используемые при испытании двигателей, отградуированы не в единицах Международной системы СИ (системы интернациональной), а в единицах МКГСС, СГС и часто внесистемных единицах, в книге приведены основные соотношения между соответствующими единицами этих систем, позволяющие пересчитывать результаты измерений в единицы СИ*. В ГОСТ 18509—73 на методы стендовых испытаний тракторных и комбайновых дизелей применена только система СИ, но в силу указанных причин допускается использование единиц измерения других систем.

Автор приносит искреннюю благодарность научному редактору доц. Е. К. Корси, рецензентам проф. Н. Г. Мозохину и коллективу кафедры «Автотракторные двигатели» МАДИ, просмотревшим рукопись книги и сделавшим ценные замечания. Автор выражает также признательность канд. техн. наук Л. А. Захарову, А. С. Радзивану и Б. Я. Черняку и инж. В. Я. Бусыгину, С. А. Воронцову и К. С. Руновскому за помощь, оказанную ими в работе над рукописью книги.

Автор

* Следует иметь в виду, что в системах СИ и МКГСС единицы измерений совпадают по величине, если размерность последних не содержит единиц массы или силы. Иначе, для перехода от системы МКГСС к системе измерений СИ числовое значение данной величины надо умножить на 9,81, а в ее размерности заменить кгс на Н. Наоборот, при переходе от единиц СИ к единицам МКГСС — числовое значение данной величины необходимо разделить на 9,81, а в размерности заменить кг (или Н) на кгс·с²/м (или на кгс). Коэффициент 9,81 служит, таким образом, коэффициентом перехода от одной системы к другой и численно равен ускорению силы тяжести на поверхности Земли.

ГЛАВА I

МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ И ТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

§ I.1. Назначение и виды испытаний

Испытания составляют заключительный этап сложного процесса создания и совершенствования двигателей внутреннего сгорания.

Проектирование двигателя начинают с определения основных его размеров, т. е. с выбора диаметра цилиндра и хода поршня. Учитывая сложившиеся статистические нормы на проектирование данного типа двигателей и результаты теплового расчета, определяют также размеры других элементов конструкции и выполняют общую ее компоновку. На последующем этапе проводят динамический расчет, находят величины нагрузок на основные элементы разрабатываемой конструкции и уточняют их размеры путем расчета на износ и усталостную прочность. Расчетным путем определяют также размеры всех вспомогательных систем двигателя.

Однако действительные нагрузки на элементы создаваемой конструкции и общая эффективность ее могут быть определены только в результате натурных испытаний комплектного двигателя, его механизмов, систем и отдельных деталей. Как правило, объявляемые мощность, экономичность, токсичность и другие оценочные показатели двигателя, его надежность и долговечность устанавливают путем испытаний в стендовых и эксплуатационных условиях.

Различным видам испытаний в этой связи подвергают все вновь создаваемые, модернизируемые и серийные двигатели автомобилей и тракторов. При этом каждый вид испытаний проводят с вполне определенной целью. Например, изучение процессов в механизмах и системах, выбор и уточнение для них регулировок, подбор топлив и масел, выполнение поисковых и других специализированных исследований.

Поэтому в зависимости от назначения различают испытания: исследовательские; доводочные; приемочные (государственные); контрольные; приемо-сдаточные и эксплуатационные. Сообразно с характером испытаний их разделяют на две большие группы: научно-исследовательские и типовые, причем к типовым относят испытания, регламентируемые ГОСТами на испытания двигателей.

Исследовательские испытания проводят с целью совершенствования существующих двигателей, перехода на иную компоновку или

тип двигателя, при разработке принципиально новых силовых агрегатов, отдельных систем, узлов и деталей, а также в случаях апробирования новых конструкционных материалов, износостойких покрытий, при изменении условий работы двигателя, его форсировке, переводе на другие виды топлив, смазок и т. д. Чтобы подчеркнуть целевое назначение, иногда выделяют испытания износные, пусковые, регулировочные, на токсичность и дымность, на безотказность или надежность и т. д.

Исследовательские испытания проводят как в стендовых, так и в ходовых условиях в полном соответствии с детально разработанной методикой, согласованной и утвержденной в рамках установленных ведомственных правил. В методике четко формулируются цели и задачи исследования, фиксируются исходные параметры испытуемого объекта, обосновывается выбор испытательной установки и необходимой аппаратуры. В отдельных случаях проводят предварительную теоретическую разработку исследуемого вопроса.

Результаты таких испытаний используют для уточнения методов расчета элементов, механизмов и систем двигателя или выбора для них оптимальных вариантов конструкции. При необходимости и в интересах экономии средств, уменьшения объема работ и повышения точности результатов прибегают к методам моделирования, проводят испытания на безмоторных установках, одноцилиндровых отсеках двигателей и т. д.

Научные исследования ведут лаборатории конструкторско-экспериментальных отделов заводов-изготовителей, специализированные отраслевые научно-исследовательские институты или конструкторские бюро и лаборатории соответствующих высших учебных заведений.

Доводочные испытания проходят все вновь создаваемые или модернизируемые двигатели, отдельные их механизмы и системы. Цель испытаний состоит в проверке соответствия выбранных размеров двигателя и основных его оценочных параметров расчетным, выявления истинного взаимовлияния отдельных систем на развернутом двигателе, доводке двигателя в целом и всех его элементов до уровня требований, установленных техническим заданием на проектирование. Доводочные испытания отдельных систем часто носят характер исследовательских испытаний.

При доводочных испытаниях проверяют правильность выбора конструкционных материалов и технологии изготовления деталей в связи с требованиями прочности, надежности или безотказности и долговечности построенного объекта. Испытания проводят в лабораторных и, как правило, ходовых условиях на шасси, для которого предназначен двигатель. При этом выявляют фактический моторесурс двигателя, уточняют регулировки систем и определяют его эксплуатационные свойства, как-то: расход топлива и масла, приемистость, легкость пуска в холодном и горячем состояниях, устойчивость работы в различных условиях (отсутствие провалов при разгонах и т. д.), токсичность, дымность и другие показатели.

Доводочные испытания (в том числе предварительные и типовые

по ГОСТ 18508—73) планирует и проводит конструкторско-экспериментальный отдел завода, в частности, перед ведомственными (заводскими), междуведомственными и государственными испытаниями, вносит изменения в последующую серию опытных образцов создаваемого двигателя.

4 Приемочные испытания двигателей новых и модернизированных конструкций проводят согласно ГОСТ 14846—69 после завершения всех доводочных работ, включая регулировочные испытания. Двигатели, предъявляемые к приемочным (государственным) испытаниям, должны соответствовать чертежам, иметь техническую характеристику (паспорт), подписанную главным конструктором, и пройти предварительную обкатку в объеме не более 60 ч по программе завода-изготовителя.

Перед началом испытаний двигатель разбирают, проводят установленный ГОСТом микрометраж его основных деталей*, собирают и обкатывают в течение 5÷10 ч. Определяют наибольшие габариты комплектного двигателя, его вес, заправочные емкости систем охлаждения и смазки.

В процессе испытаний снимают характеристики с целью определения: мощностных и экономических показателей, минимальных чисел оборотов вала под нагрузкой и на холостом ходу, расхода топлива на холостом ходу, механического к. п. д. и равномерности работы цилиндров. Определяют также устойчивость работы двигателя, его пусковые качества, токсичность и, наконец, надежность для выявления тщательности изготовления и совершенства конструкции.

Мощностные и экономические показатели определяют при полных и частичных нагрузках. Скоростные характеристики для бензиновых двигателей, снабженных ограничителем оборотов вала, снимают с включенным и выключенным ограничителем. Нагрузочные характеристики снимают не менее чем на трех числах оборотов вала, включая обороты, соответствующие $M_{кр\ max}$. При наличии всережимного регулятора регуляторные характеристики определяют для тракторных двигателей при $n_{x\ max}$, $(0,85—0,7)n_{x\ max}$, а для автомобильных — дополнительно при $0,5n_{x\ max}$.

Испытания на надежность (безотказность) регламентируются ГОСТами и состоят из последовательно повторяющихся циклов — трехчасовых для автомобильных и четырехчасовых для тракторных двигателей.

Трехчасовые циклы проводят по программе: пуск и прогрев; холостой ход при $n_{x\ min} + 300$ об/мин — 5 мин; полное открытие дроселя или полная подача топлива при $n_{ном}$ — 2 ч 50 мин; холостой ход при $n_{x\ min} + 300$ об/мин — 5 мин; остановка — 10 мин.

Четырехчасовые циклы: холостой ход при n_{max} — 10 мин; полная подача топлива при $n_{M_{кр.\ max}}$ — 10 мин; то же при $n_{ном}$ — 3 ч 30 мин; холостой ход при n_{max} — 10 мин; остановка — 10 мин.

* Микрометричные карты должны отвечать нормам, установленным ГОСТом на каждую обследуемую деталь двигателя с обязательным указанием в них температуры окружающей среды, а также наименования и номера измерительного инструмента.

Общая продолжительность таких испытаний должна составлять: для бензиновых двигателей легковых автомобилей с литражом до 1 л — 250 ч; свыше 1 до 2,5 л — 300 ч; свыше 2,5 л — 350 ч; для бензиновых двигателей грузовых автомобилей и автобусов с литражом до 2,5 л — 350 ч; свыше 2,5 до 7 л — 400 ч; свыше 7 л — 450 ч; для автомобильных дизелей с литражом до 7,0 л — 600 ч и свыше 7 л — 1000 ч; для тракторных двигателей — 800 ч. Установленная продолжительность испытаний для двигателей различных типов обусловлена особенностями их эксплуатации. Тракторные двигатели и дизели тяжелых грузовых автомобилей работают с гораздо большими нагрузками, чем обычные автомобильные, для которых характерны режимы частичных нагрузок.

В процессе испытаний на надежность строго учитывают расход топлива и масла, а технический уход за двигателем проводят согласно заводской инструкции по эксплуатации. В протоколе испытаний фиксируют все замеченные неполадки в работе двигателя, замену и ремонт отдельных деталей, узлов.

По данным испытаний на определение мощностных и экономических показателей и результатам микрометража, проводимого перед началом и по окончании испытаний на надежность, определяют износ основных деталей и выявляют стабильность параметров двигателя. Первичный и повторный микрометраж основных деталей, к которым относят: цилиндры (гильзы), поршни, их кольца и пальцы, коленчатый вал, коренные и шатунные подшипники, втулки верхней головки шатуна, распределительный вал и клапаны, проводят по одной программе, одним и тем же инструментом и в одинаковых условиях по установленной ГОСТами методике.

Двигатель считается не выдержавшим испытаний на безотказность (надежность) в случае поломок, аварийных заеданий или задиоров и опасных стуков, для устранения которых требуется разборка и ремонт или замена основных деталей двигателя или его агрегатов в процессе испытаний или по окончании их, а также вследствие снижения мощности и ухудшения экономичности более чем на 5% от первоначально замеренных, угара масла, превышающего нормы завода-изготовителя, или снижения давления масла против установленного нижнего предела и повышенного износа деталей. В настоящее время требования к расходу масла резко повысились. Новые автомобильные и тракторные двигатели не должны потреблять более 1% масла от расхода топлива.

По окончании приемочных (государственных) испытаний составляют отчет, в котором отмечают: соответствие двигателя проектному заданию, современность и совершенство его конструкции, уровень технико-экономических показателей, надежность (безотказность), пусковые качества, а также возможности дальнейшего развития и улучшения конструкции.

Контрольные испытания серийных двигателей, согласно ГОСТам, проводят в комплексе с генератором, воздухоочистителем и другими агрегатами, необходимыми для работы их в условиях эксплуатации, но без вентилятора, глушителя шума выпуска и оборудования, пред-

назначенного для обслуживания шасси (компрессора и т. д.). ГОСТ 18508—73 разделяет контрольные испытания на периодические кратковременные и длительные. ГОСТ 14846—69 не предусматривает такого деления, но в случае необходимости проверки качества изготовления и сборки серийных двигателей допускает испытания на безотказность по описанной выше программе.

Двигатели, поступающие на контрольные испытания, должны соответствовать техническим условиям и иметь документы о приемке ОТК завода-изготовителя. Периодичность этих испытаний определяется техническими условиями.

Кратковременные контрольные испытания серийных двигателей проводят с целью проверки соответствия технико-экономических показателей их утвержденным техническим условиям. При испытании определяют мощностные и экономические показатели путем снятия скоростных и нагрузочных характеристик для автомобильных бензиновых двигателей и регуляторной характеристики для тракторных двигателей и автомобильных дизелей. Определяют степень неравномерности регулятора, равномерность работы цилиндров, механический к. п. д., расход топлива на минимальном числе оборотов холостого хода и угар масла.

Длительные контрольные испытания серийных двигателей проводят с целью проверки качества изготовления двигателей и одновременно установления соответствия их показателей техническим условиям. Кроме выполнения программы кратковременных испытаний при длительных контрольных испытаниях определяют устойчивость работы двигателя, его пусковые качества, токсичность и надежность с обязательной разборкой двигателя для повторного микрометража основных деталей по ГОСТу. Перед повторным определением мощностных и экономических показателей допускается удаление нагара с поверхностей камер сгорания, прочистка сопловых отверстий форсунок (в дизелях) и притирка клапанов.

Считается, что двигатель не выдержал контрольных испытаний, если оценочные показатели его не соответствуют утвержденной технической характеристике или в процессе работы обнаружены дефекты, устранение которых связано с заменой основных деталей.

Приемо-сдаточные испытания проходят все серийные двигатели, выходящие с завода. Испытания проводят на испытательной станции моторного цеха, куда двигатели поступают непосредственно со сборки. Двигатели устанавливают на стенды, подключают к общим коммуникациям станции и обкатывают по установленной программе. Если в процессе обкатки и последующей контрольной проверки двигателя обнаруживают неполадки, то его направляют на устранение дефектов, а затем повторно испытывают.

Эксплуатационные испытания двигателей проводят специализированные научно-исследовательские организации и соответствующие лаборатории заводов-изготовителей с целью определения износа деталей двигателя и выявления его долговечности в различных климатических и дорожных условиях, а также уточнения эксплуатационных регулировок и норм расхода горюче-смазочных материалов.

По результатам эксплуатационных испытаний определяют коэффициенты сменности деталей, что необходимо для правильной организации производства запасных частей, уточняют пробеги до капитальных ремонтов и т. д.

§ 1. 2. Проведение испытаний

Двигатели, принятые ОТК завода, перед началом любых из названных испытаний предварительно обкатывают по программе завода-изготовителя, но не более 60 ч.

Типовые испытания, как правило, проводят на прогревом двигателе с регулировкой, выполненной по инструкции завода. Если испытатели не располагают конкретными указаниями о выборе теплового режима для данного двигателя, то ГОСТы рекомендуют поддерживать на выходе из двигателя температуру жидкости $80 \div 90^\circ \text{C}$, а температуру масла в картере $85 \div 95^\circ \text{C}$. При испытании двигателей воздушного охлаждения температура окружающего воздуха не должна превышать 40°C , а температура масла — выходить за пределы 100°C . Испытания проводят на топливе и масле, рекомендуемых заводом-изготовителем при наличии на эти эксплуатационные материалы паспорта, удостоверяющего соответствие их физико-химических параметров заданным.

В исследовательских испытаниях регулировку механизмов и систем двигателя, тепловой режим его, выбор эксплуатационных материалов и прочие условия оговаривают в программе работ. Если необходимо, условия испытаний изменяют в нужных пределах и корректируют в процессе выполнения программы. Обязательно уточняют комплектность испытуемого двигателя, поскольку на привод его вспомогательных агрегатов затрачивается часть мощности. Стендовые испытания в большинстве случаев проводят со снятыми лопастями вентилятора, отключенным компрессором и т. д.

При определении характеристик двигателя количество точек замера должно быть не менее 6—8, если это в полной мере позволяет выявить закономерность протекания экспериментальной взаимосвязи обследуемых параметров. Показатели двигателя рекомендуется определять при установившемся режиме работы, а регистрируемые данные должны быть средними устойчивыми значениями, непрерывно наблюдаемыми не менее 1 мин, без каких-либо значительных изменений в течение этого времени.

Измеряемые величины вносят в протокол или журнал испытаний сразу же по окончании наблюдения и обязательно нумеруют записи. Нумерация замеров особенно важна, когда работу одновременно выполняют несколько испытателей (например, группа студентов) на отведенных им постах, а затем записи переносят в общий протокол. Последнему, как правило, присваивают свой порядковый номер. Большинство записей используют для последующей машинной или ручной обработки протокола испытаний, по результатам которой составляют таблицы и строят графики, необходимые для анализа экспериментальных материалов. Однако все это приносит пользу только в случаях,

когда записи в протоколе ведутся аккуратно, полно и последовательно.

Кроме всего, в протоколе фиксируют все неполадки или отклонения от обычных норм, наблюдавшиеся во время проведения испытания, отмечают вынужденные перерывы в работе и т. д. Без этого трудно воссоздавать истинную картину испытания и объективно оценивать его по завершении программы.

Чтобы повысить объективность и точность замеров, обеспечить оперативное наблюдение за определяющими показателями и сократить затраты времени на обработку результатов, в лабораториях применяют автоматизированные системы испытания двигателей (АСИД), позволяющие фиксировать показатели в цифровом виде, записывать сигналы на магнитные ленты, воспроизводить их на экране осциллографа или же в кодированном виде направлять непосредственно в ЭВМ. С помощью ЭВМ выполняют также все особенно трудоемкие операции по обработке результатов наблюдений.

Перед началом испытаний, в процессе проведения и по окончании их обязательно определяют и фиксируют следующие исходные данные и наблюдаемые величины: характерные параметры или тип испытуемого двигателя и испытательной установки; сорт и плотность масла и топлива; давление, температуру и влажность окружающего воздуха; температуру охлаждающей жидкости на выходе из системы охлаждения двигателя; температуру и давление масла; показания динамометра; скорость (частоту) вращения вала и суммарное его количество оборотов за принятое время измерения; среднее давление во впускном трубопроводе; расходы топлива и воздуха; угол опережения зажигания или подачи топлива (в дизелях).

В случае необходимости количество измеряемых величин не ограничивают перечисленными. Так, в зависимости от назначения исследовательских испытаний часто вносят в протокол или фиксируют путем записи на специальную ленту многие другие параметры. Например, закономерность изменения давлений в цилиндре по углу поворота коленчатого вала двигателя, явления детонации, температуру потока в отдельных зонах впускного тракта или характер переменных пульсирующих давлений в нем и т. д. В ряде случаев возникает необходимость измерять температуру отработавших газов, химический состав газов, расход охлаждающей жидкости, масла, а также вибрации отдельных деталей, линейные или угловые перемещения их, тепловое состояние и прочие параметры, знание которых необходимо при изучении процессов в двигателях.

Для получения исчерпывающей информации о перечисленных параметрах необходимо не только большое количество различных приборов и мерительных устройств, но также самые разнообразные способы и методы измерений. Поэтому испытатель должен обладать определенными сведениями из областей измерений и измерительных приборов, уметь оценивать качества и возможности последних и т. д. Без знания этого трудно рассчитывать на правильный выбор и рациональное использование мерительных средств в конкретных условиях проведения испытаний двигателя.

§ 1. 3. Требования к измерительным средствам и точности измерений

Испытатели автомобильных и тракторных двигателей имеют дело не только с большим количеством экспериментально определяемых величин и исследуемых факторов, но также должны учитывать, что скорости изменения многих из них охватывают диапазон от быстро текущих до медленно изменяющихся. Например, протекание рабочих процессов в цилиндрах двигателя характеризуется почти мгновенным изменением наблюдаемых величин, а тепловое состояние двигателя, наоборот, медленно или вовсе не изменяется при установившемся режиме работы. Однако сравнимость получаемых результатов и достоверность их в любом случае зависят от правильного выбора соответствующей измерительной аппаратуры, которая должна обеспечивать:

- 1) заданную точность измерения обследуемых параметров;
- 2) стабильность показаний в реальных условиях испытаний при наличии неизбежного действия вибрации вследствие работы поршневого двигателя, возможных колебаний напряжения в электрической сети лаборатории или изменения температуры в окружающей среде и других внешних возмущающих факторов;
- 3) необходимое быстродействие при одновременном исключении возможности появления помех протеканию обследуемых процессов или искажения измеряемых параметров;
- 4) необходимую чувствительность действия, позволяющую надежно измерять физические величины в соответствии с заданной точностью.

Кроме того, желательно, чтобы измерительные устройства и приборы имели возможно малые габариты, простую и удобную для наблюдений, регулировок и обслуживания конструкцию, допускали дистанционные измерения, когда наблюдатель и пульт управления удалены от объекта испытаний.

Наиболее полно этим требованиям отвечают современные электромеханические и электронные измерительные устройства. Применительно к исследованиям двигателей последние практически безынерционны, допускают регулирование пределов измерений и автоматическое введение поправок в получаемые результаты, а также позволяют автоматизировать и запись, и обработку результатов измерений.

Основными критериями при выборе средств измерения обычно служат точность и быстродействие. Приборы, обладающие большой точностью, т. е. малой относительной погрешностью, и соответствующей этому высокой чувствительностью, в тяжелых условиях работы могут быстро утратить стабильность и преждевременно выйти из строя. Поэтому выбор средств измерительной техники следует тщательно увязывать с требованиями точности измерений и характером проводимых испытаний, не ужесточая их без необходимости.

При типовых испытаниях по ГОСТу достаточной считают, например, точность $\pm 0,5\%$ при измерении крутящего момента, числа оборотов вала двигателя и расхода топлива (весовым способом). Температуру окружающего воздуха измеряют с точностью $\pm 0,5^\circ \text{C}$; давление до ± 1 мм рт. ст.; относительную влажность его — с точностью $\pm 2\%$; расходы воздуха — с точностью $\pm 2\%$, а картерных газов — $\pm 3\%$; температуры жидкости в системе охлаждения и масла в картере — с точностью $\pm 1^\circ \text{C}$; температуру отработавших газов до $\pm 20^\circ \text{C}$ и давление последних — с точностью $\pm 3\%$.

В исследовательских испытаниях требования к точности замеряемых параметров соответственно повышаются в зависимости от целей исследования.

При соблюдении указанных рекомендаций на измерения точность определения величины эффективной мощности двигателя составляет примерно $\pm 2\%$ для типовых и менее $\pm 1\%$ в исследовательских испытаниях; соответственно удельный расход топлива — $\pm 3\%$ и примерно $\pm 1\%$.

Работа измерительной аппаратуры и пользование ею осложняются тем, что вследствие действия случайных внешних факторов, а также перебоев в питании, зажигании и прочих причин всегда возможны отклонения от принятого режима испытаний. Точное поддержание режима испытаний на заданном уровне — задача сложная и требует от персонала испытателей, кроме необходимых знаний, большого навыка выводить двигатель на заданный режим испытаний и поддерживать его в течение замера. В неквалифицированных руках любые возможности приборов не принесут пользы, так как нарушения режима испытаний в процессе замера нельзя компенсировать точностью и безынерционностью измерительных средств. Поэтому натренированность испытателей играет существенную роль в получении достоверных результатов испытаний.

Чтобы облегчить эту задачу, испытательные стенды снабжают специальной контрольной аппаратурой, позволяющей быстро и уверенно выходить на заданный режим испытаний и непрерывно следить за правильным соблюдением его. Приборы такого назначения не отличаются большой точностью, но значительно уменьшают вспомогательное время, затрачиваемое на проведение стендовых испытаний, и в конечном итоге повышают качество испытаний. К таким приборам относятся различные тахометры, расходомеры и аналогичные им устройства.

Подробные сведения о принципах работы отдельных приборов, их устройстве, тарировке и пользовании ими приведены в соответствующих разделах курса. Здесь отметим лишь то, что согласно ГОСТу все измерения следует выполнять приборами и устройствами, предварительно проверенными или протарированными в соответствии с существующими положениями о контроле измерительных приборов.

ГЛАВА II

ОСНОВЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ИЗМЕРЕНИЙ, ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

§ II.1. Краткие сведения об измерениях и измерительных приборах

Измерением называют процесс сравнения изучаемой физической величины с однородной величиной, принятой за единицу, а тела или устройства, воспроизводящие эту единицу, называют *мерой*.

При исследовании сложных явлений, в частности быстroteкущих процессов в двигателях внутреннего сгорания, непосредственное сравнение изучаемых величин с мерой невозможно. В таких случаях измеряемые величины или параметры преобразуют в другие и сравнивают их с соответствующими единицами измерения.

В общем случае путем измерения определяют числовое значение

$$x = A/a,$$

показывающее, во сколько раз измеряемая величина A отличается от принятой для нее единицы a измерения. По способу получения числового значения x различают прямые, косвенные и совокупные измерения.

Прямые измерения заключаются в непосредственном сравнении измеряемой величины с ее мерами, в том числе путем использования измерительных приборов, градуированных в единицах измерения данной физической величины. В практике такие измерения осуществляют:

1) методом непосредственной оценки с помощью мер или измерительных приборов (длину — линейкой, диаметр — штангенциркулем, давление — манометром, температуру — термометром);

2) дифференциальным или разностным методом, когда числовое значение определяемой величины получают как разность между измеряемой и известной величинами или между двумя физическими величинами (разность давлений — дифференциальным манометром или пьезометром, разность силы токов — логометром и т. д.);

3) нулевым методом, когда действие измеряемой физической величины уравнивается действием известной физической величины (измерение термо-э. д. с. — термопары — потенциометром, массы — гирями на рычажных весах и т. д.);

4) методом совпадений или совмещений, когда равномерно чередующиеся сигналы, характеризующие измеряемую величину, срав-

нивают с сигналами от известной физической величины (обороты — строботометром).

Простейшим примером прямого измерения при данной температуре может служить измерение разности давлений $p_1 - p_2$ с помощью U-образной стеклянной трубки, заполненной жидкостью (рис. II.1, а). Под действием разности давлений мениски жидкости смещаются в таком манометре на величину

$$H = (p_1 - p_2) / (\rho g),$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м³; g — ускорение силы тяжести, м/сек².

Очевидно единичное перемещение, вызванное действием разности давлений, равной 1 кгс/м²,

$$h_{\text{ед}} = (p_1 - p_2)_{\text{ед}} / (\rho g).$$

Непосредственное сравнение двух линейных перемещений H и $h_{\text{ед}}$ дает возможность найти результат измерения как отношение

$$x = H / h_{\text{ед}} = (p_1 - p_2) / (p_1 - p_2)_{\text{ед}},$$

где $(p_1 - p_2)$ и $(p_1 - p_2)_{\text{ед}}$ — соответственно измеряемая и единичная разности давлений.

Для визуального определения результата измерения служит шкала с отметками, расстояние между которыми $h_{\text{ед}}$, выражаемое в мм, соответствует относительному смещению менисков под действием единичной разности давлений. Следовательно, разность давлений в рассматриваемом примере определяют по показаниям предварительно отградуированной шкалы методом сравнения двух физических величин, когда посредником сравнения служат механические перемещения.

Косвенные измерения заключаются в определении числового значения измеряемой величины путем математической обработки прямых измерений нескольких величин, связанных с искомой величиной известным уравнением. Например, для определения плотности тела ρ_t (кг/м³) прямыми измерениями определяют объем тела V_t (м³) при данной температуре t (°C) и массу m (кг), а затем вычисляют

$$\rho_t = m / V_t.$$

Косвенные измерения относятся к самым распространенным. Их применяют в случаях, когда искомую величину невозможно или сложно измерить непосредственно, а также когда косвенные измерения дают более точный результат, чем прямые.

Совокупные измерения заключаются в определении числового значения измеряемой величины путем вычисления по результатам прямых измерений одной или нескольких величин, выполненных при различных условиях эксперимента.

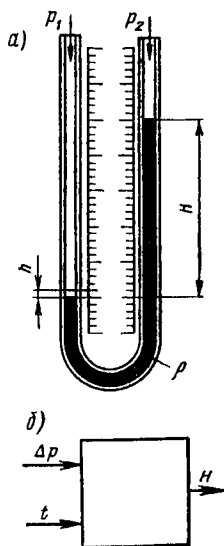


Рис. II.1. U-образный жидкостный манометр: а — принципиальная схема и б — структурная схема

Для осуществления непосредственного сравнения измеряемой величины с ее мерой или получения и сравнения соответствующих им значений нового параметра-посредника служат устройства, называемые *контрольно-измерительными*, или просто *измерительными приборами*.

Измерительные приборы представляют собой совокупность взаимосвязанных преобразователей измеряемых величин в величины, удобные для измерения, усиления, передачи на расстояние и индикации результатов.

Работа измерительных приборов основана на различных физических закономерностях, связывающих данную величину A и ее меру a функциональной зависимостью, выраженной в виде линейных, угловых или иных величин, что позволяет осуществлять прямое их сравнение и, с помощью соответствующей шкалы или другого приемлемого отсчетного приспособления, находить числовое значение

$$x = H/h_{\text{ед}} = A/a.$$

В измерительных приборах каждое преобразование величин входных в выходные рассматривают как отдельное звено прибора. При анализе приборов звенья их условно изображают в виде прямоугольника со стрелками, указывающими направление действия физических величин. Например, жидкостный манометр, показанный на рис. II.1, а, представляет собой прибор с одиночным звеном (рис. II.1, б). Входными для него являются величины: разность давлений $p_1 - p_2$ и температура t окружающей среды, поскольку она влияет на объем жидкости, а выходной величиной — суммарное перемещение менисков, равное H .

Когда выходные величины малы, в приборы вводят усилительные звенья, включаемые обычно последовательно первым звеньям. Цепочку взаимосвязанных в определенной последовательности звеньев называют *структурной схемой* прибора. В каждом звене структурной схемы одни величины преобразуются в другие по соответствующему закону, который описывается математическими выражениями, определяющими зависимость выходных величин от входных в состоянии равновесия действующих и противодействующих сил или моментов, т. е. в статике. Поэтому такие математические выражения называют *статическими характеристиками* прибора, наличие которых и является одним из условий существования звена [68].

В зависимости от места, которое занимает звено в структурной схеме измерительного прибора, различают первичные, промежуточные и конечные, или выходные, звенья.

Первичные звенья контактируют с изучаемой средой и образуют чувствительный элемент прибора. Если чувствительный элемент преобразует измеряемую физическую величину в параметры другой физической величины, то его называют *датчиком*; в других случаях — *приемником*. Приемники должны, следовательно, передавать измеряемую величину в измерительную цепь без искажений. Примером этого может служить измерение статического давления в сосудах и трубопроводах через отверстие в стенке последних. Датчики, обе-

спечивающие функциональную связь между величинами измеряемой и посылаемой в измерительную цепь, могут быть механическими, гидравлическими, термическими, оптическими, пьезоэлектрическими и т. д. В исследованиях двигателей особенно широко применяют датчики, позволяющие измерять неэлектрические величины электрическими средствами.

Промежуточные звенья передают физические величины по измерительной цепи от первичных к конечным выходным звеньям. При передаче и одновременном увеличении механических перемещений применяют рычажные, шестеренчатые и другие механизмы, соответственно которым звенья называют *передаточно-множительными механизмами*. Если используются иные принципы преобразования, промежуточные звенья называют *усилительными, согласующими, выпрямительными* и т. д.

В зависимости от способа преобразования информации в промежуточном звене все измерительные приборы разделяют в настоящее время на две большие группы: с амплитудными, называемыми также аналоговыми, преобразователями и с дискретными преобразователями [62].

Приборы аналогового типа преобразуют измеряемую (входную) амплитудно-изменяющуюся величину в однозначно связанную с ней функциональной зависимостью выходную величину, например, угол поворота — в напряжение, сопротивление, частоту и т. д.

Приборы дискретного действия преобразуют входные амплитудно-изменяющиеся величины в сочетание импульсов, однозначно связанных с амплитудой входной величины функциональной зависимостью — *кодом*. Приборы этого типа обеспечивают большую точность отсчета, так как действуют по принципу «да — нет». Они значительно меньше подвержены влиянию внешних условий (температуры, напряжения питания, вибрации) и даже действию погрешностей изготовления.

Дискретные преобразователи относятся к классу автоматических устройств, называемых *дискретными автоматическими системами*, для которых характерен процесс *квантования*, т. е. замена бесчисленного множества значений измеряемой величины конечным количеством этих значений с помощью импульсных модуляторов или кодирующих устройств. Различают квантование по времени, по уровню и одновременно по обоим параметрам. На принципе дискретности счета основаны, например, электронные цифровые приборы, вычислительные и управляющие машины.

Конечные звенья образуют указатель или регистрирующую выходную часть прибора, которую снабжают шкалой, цифровым указателем (при дискретном счете) или автоматическим записывающим устройством.

При наличии шкалы на нее наносят отметки (штрихи), каждая из которых условно изображает определенное числовое значение измеряемой величины. Начальная отметка шкалы соответствует наименьшему, а конечная — наибольшему значениям или пределам измеряемой

величины. Область между начальной и конечной отметками называют *диапазоном измерения*. Участок шкалы между двумя соседними штрихами называют *делением шкалы*, а приращение измеряемой величины, соответствующее одному делению, — *ценой деления*. Эта величина часто дается как постоянная прибора, т. е. как число, на которое надо умножить отсчет, чтобы получить значение измеряемой величины.

Одной из основных характеристик аналоговых приборов является зависимость перемещения стрелки их указателя от величины измеряемого параметра. Если при этом известна статическая характеристика прибора, то можно определить его чувствительность.

Чувствительностью прибора называют отношение линейного или углового перемещения стрелки указателя к изменению измеряемой величины, вызвавшему это перемещение.

При линейной статической характеристике чувствительность прибора k_d определяется отношением любого значения выходной величины α к значению вызвавшей ее измеряемой величины A :

$$k_d = \alpha / A.$$

При нелинейной статической характеристике чувствительность прибора по диапазону его шкалы меняется. В этом случае используют мгновенную чувствительность $k_{нл}$. Ее величину находят дифференцированием статической характеристики по входной величине:

$$k_{нл} = d\alpha / dA.$$

Чем больше единиц шкалы приходится на единицу измеряемой величины, тем чувствительнее прибор.

Порог чувствительности измерительного прибора характеризуется минимальным значением измеряемой величины, которое можно уверенно обнаружить с помощью данного прибора. Порог чувствительности имеет большое значение для приборов, применяемых в качестве нуль-индикаторов при измерении нулевым методом.

Точность измерительного прибора определяется степенью достоверности результатов измерения им. Ее принято оценивать величиной положительного и отрицательного пределов ($\pm$) наибольшей допускаемой прибором погрешности ΔA . Чем меньше по абсолютной величине эта погрешность, тем больше точность прибора и выше класс его точности.

Класс точности приборов выражают величиной приведенной погрешности, т. е. отношением наибольшего значения абсолютной погрешности к предельному или верхнему $\alpha_{\max}$ значению шкалы прибора в процентах:

$$\delta_{\text{прив}} = (\Delta A / \alpha_{\max}) 100.$$

Наибольшая приведенная относительная погрешность и является, следовательно, классом точности измерительных приборов. Например, по ГОСТ 1845—59 электроизмерительные приборы подразделяют на классы от 0,1 до 4,0. Более грубые приборы обозначения класса точности не имеют. Класс прибора обозначают на шкале

соответствующей цифрой, обведенной окружностью. При этом к классу точности, положим 1,0, могут быть отнесены только приборы, у которых в нормальных условиях эксплуатации приведенная относительная погрешность не превышает $\pm 1,0\%$.

Если известен класс точности прибора и верхний предел измерения, на который он рассчитан, то легко можно вычислить возможные абсолютную и относительную погрешности конкретного измерения. Попытки измерить данным прибором с точностью большей, чем присущая ему, не имеют практического смысла.

Вариацией показаний прибора называют наибольшую разность между его отдельными повторными показаниями, соответствующими одному и тому же значению измеряемой величины при неизменных внешних условиях. Величина вариации большинства аналоговых приборов зависит в основном от трения в опорах подвижной их части, в дискретных — от характеристик элементов управления ими.

Сообразно с точностью измерений приборы делят на образцовые и рабочие.

Образцовые измерительные приборы служат эталонами, позволяющими воспроизводить и хранить единицы измерения, а также проверять и градуировать другие измерительные приборы.

Рабочие приборы служат для практических измерений. Различают *лабораторные контрольные приборы*, в которых предусмотрено внесение поправок к показаниям в процессе измерения, и более грубые — *технические приборы*. В показания последних поправок не вносят, но в паспорте прибора указывают гарантированную точность измерения в определенном интервале изменения внешних условий.

§ 11.2. Погрешности измерений

Известно, что измерения не могут быть выполнены абсолютно точно и всегда содержат некоторую ошибку. Несмотря на разнообразие причин, характера и природы ошибок измерений, все погрешности разделяют на два основных вида: объективные и субъективные.

Объективные погрешности возникают вследствие несовершенства принятого метода измерения, особенностей конструкции прибора и влияния внешних условий на процесс измерения. При этом различают погрешности: статические, наблюдаемые при измерении постоянных по времени величин, и динамические, наблюдаемые при измерении переменных по времени величин.

Статические и динамические погрешности образуют категорию так называемых систематических погрешностей.

К объективным относят также категорию случайных погрешностей.

Статические погрешности складываются: во-первых, из погрешностей, связанных со свойствами материалов, технологией их обработки, качеством изготовления и сборки деталей прибора и другими параметрами прибора-инструмента; во-вторых, из погрешностей, связанных только с методикой измерения, положенной

в основу построения данного прибора. В силу этого статические погрешности разделяют на инструментальные и методические.

К инструментальным погрешностям относят погрешности, возникающие от трения, излишних зазоров в опорах, неточности изготовления, сборки и регулировки узлов, изменения упругих свойств и линейных размеров деталей с течением времени, в связи с перегрузками и изменением температуры и т. д.

Чтобы уменьшить инструментальные погрешности, в приборах применяют специальные материалы, вводят компенсаторы, экранирование, герметизацию и, как правило, оговаривают рабочие пределы внешних условий.

Методические погрешности обуславливаются самим принципом построения прибора. Они не связаны с многочисленными факторами, порождающими инструментальные погрешности. Поэтому уменьшить или устранить их можно лишь путем изменения или замены схем и методов, положенных в основу работы звеньев измерительного прибора.

Динамические погрешности обуславливаются инерционными свойствами прибора. Наличие механической, тепловой и других видов инерционности приводит к тому, что показания прибора запаздывают при изменении входной величины или достигают нового значения после длительного затухающего колебания (успокоения), или же нарастают

(уменьшаются) пропорционально скорости изменения входной величины.

Колебательное движение подвижных частей прибора порождает амплитудные и фазовые погрешности вследствие перемещения системы в новое положение равновесия. Пока колебательное движение не прекратилось или амплитуда колебаний не уменьшилась до приемлемого предела, производить отсчет не следует.

Свойства прибора быстро прекращать или уменьшать колебания подвижной части до определенной величины оценивают временем, затрачиваемым на успокоение, которое исчисляют от момента включения прибора на половинный для него диапазон измерений, до момента, когда подвижная часть его приходит в относительно равновесное состояние и колебания ее не превышают $\pm 1\%$ от диапазона всей шкалы.

Амплитудные и фазовые погрешности, вносимые в измерения инерцией механических элементов прибора при динамическом режиме работы, можно уяснить на примере действия преобразователя (рис. 11.2). Преобразователи такого типа применяют в приборах измерения давления, в различных вибраторах и т. д.

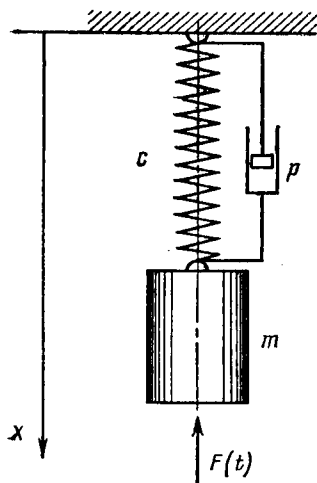


Рис. 11.2. Принципиальная схема преобразователя механических величин

Внешняя сила $F(t)$ действует в нем на массу m , связанную с корпусом при помощи упругого элемента, обладающего жесткостью c , и демпфера, обеспечивающего коэффициент успокоения p . При условии, что: масса пружины мала сравнительно с массой m ; масса m имеет только одну степень свободы (вдоль оси x); успокоитель оказывает сопротивление, пропорциональное первой степени скорости (вязкое трение) и в начальный момент времени перемещение x подвижной части, а также скорость dx/dt равны нулю, уравнение движения системы принимает вид

$$m(d^2x/dt^2) + p(dx/dt) + cx = F_{\max} \sin \omega t,$$

где $F = F_{\max} \sin \omega t$ — сила, вызывающая перемещение x подвижной части.

Окончательное решение этого уравнения

$$x = \frac{F_{\max}}{c} \frac{e^{-\beta \omega_0 t}}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin \left[\omega_0 t \sqrt{1-\beta^2} + \arctg \sqrt{\frac{1-\beta^2}{\beta^2}} \right] + \\ + \frac{F_{\max}}{c} \frac{1}{\sqrt{(\lambda^2-1)^2 + 4\beta^2 \lambda^2}} \sin \left[\omega t - \arctg \frac{2\beta \lambda}{\lambda^2-1} \right],$$

где $\beta = p/(2m\omega_0)$ — степень успокоения; $\lambda = \omega/\omega_0$ — отношение угловой частоты ω вынужденных колебаний к частоте $\omega_0 = \sqrt{c/m}$ собственных колебаний.

Первое слагаемое правой части уравнения выражает собственные затухающие колебания системы, протекающие с частотой $\omega'_0 = \omega_0 \sqrt{1-\beta^2}$ и амплитудой $F_{\max} e^{-\beta \omega_0 t} / [c(1-\beta^2)^{1/2}]$. Вследствие наличия множителя $e^{-\beta \omega_0 t}$ амплитуда собственных колебаний системы уменьшается и с течением времени стремится к нулю. Поэтому через некоторый промежуток времени отклонение прибора полностью описывается вторым слагаемым. Так, например, при значениях $\beta > 0,5$ собственные колебания вообще затухают в течение первых нескольких периодов и практически могут не приниматься во внимание.

Второе слагаемое правой части уравнения характеризует вынужденные колебания, протекающие с частотой ω изменения измеряемой силы и амплитудой

$$x_{\max} = (F_{\max}/c) \left(1/\sqrt{(\lambda^2-1)^2 + 4\beta^2 \lambda^2} \right).$$

Так как при статическом приложении силы

$$x_{\text{ст max}} = F_{\max}/c,$$

то вынужденные колебания имеют амплитуду, отличающуюся от перемещения подвижной части в статическом режиме в

$$M = x_{\max}/x_{\text{ст max}} = 1/\sqrt{(\lambda^2-1)^2 + 4\beta^2 \lambda^2}$$

раз. Следовательно, значение M характеризует амплитудную погрешность вынужденных колебаний $\gamma_f = M - 1$. При $\beta \leq 1$ и $\lambda < 0,3$

амплитудную погрешность можно с точностью до 1% вычислить по формуле

$$\gamma_f = (2\beta^2 - 1)\lambda^2.$$

Закономерности изменения величин M в зависимости от λ для различных значений степени успокоения β приведены на рис. 11.3. Анализ этих графиков показывает, что для малых значений β максимальная погрешность амплитуды будет при $\lambda = \omega/\omega_0 = 1$, т. е. в случае резонанса. Датчики, работающие в динамическом режиме

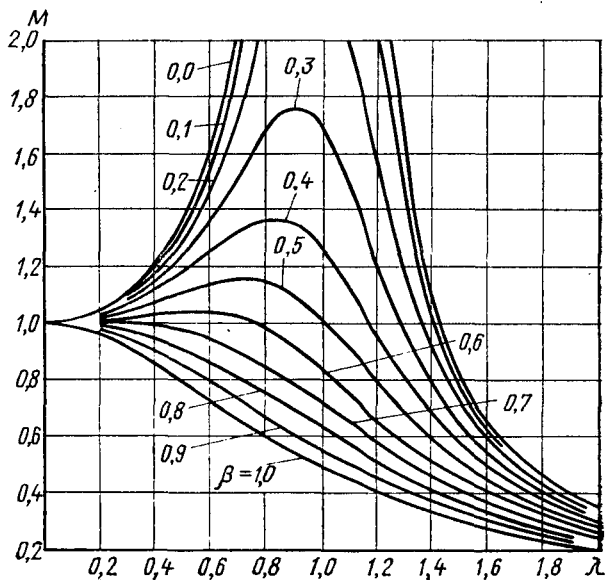


Рис. 11.3. Изменение величины M в зависимости от $\lambda = \omega/\omega_0$ при различных значениях степени успокоения β

по схеме, изображенной на рис. 11.2, должны поэтому иметь $\lambda < 1$. Практика показывает, что их собственная частота ω_0 должна быть больше частоты ω измеряемого процесса не менее чем в 2—3 раза. Амплитудная погрешность имеет минимальное значение при $\beta = 0,6 \div 0,7$.

Разность фаз между величиной возмущения и силой, его производящей, в рассматриваемом случае характеризуется множителем

$$\sin\left(\omega t - \arctg \frac{2\beta\lambda}{\lambda^2 - 1}\right),$$

который периодически с течением времени изменяется от 0 до 1. При этом фазовая погрешность в регистрации процесса вынужденных колебаний определяется углом

$$\psi = \arctg \frac{2\beta\lambda}{\lambda^2 - 1}.$$

Фазовая погрешность ψ при $\beta = 0,65 \div 0,70$ почти линейно зависит от частоты, поэтому запаздывание вынужденных колебаний подвижной части от изменения измеряемой величины для каждой частоты по времени одинаково.

Систематические погрешности возникают закономерно, поэтому могут быть определены количественно и исключены из результатов измерения путем внесения поправок на показания прибора, численно равных величинам погрешностей, взятых с обратными знаками, или же исключены соответствующей методикой проведения

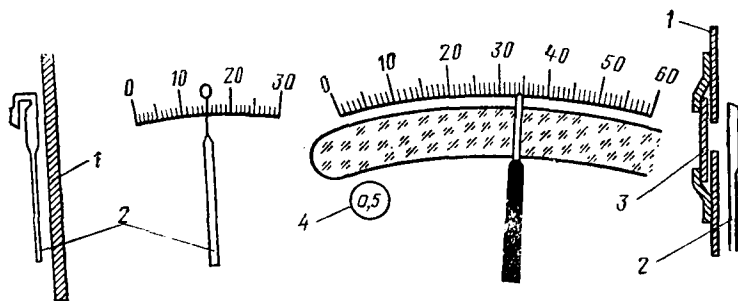


Рис. II. 4. Варианты выполнения стрелочного указателя приборов:
1 — шкала; 2 — стрелка; 3 — зеркало; 4 — знак, обозначающий класс точности прибора

измерений. Прежде чем обрабатывать результаты измерений, их необходимо освободить от систематических погрешностей.

Случайные погрешности нельзя предусмотреть заранее и вероятность таких ошибок измерения любого знака примерно одинакова, непостоянны они и по абсолютному значению. Поэтому, в отличие от систематических, случайные ошибки неустранимы и не могут быть исключены из результатов измерения внесением поправок. Влияние их на конечные результаты измерения изучается методами математической статистики и теории вероятности.

Субъективные погрешности возникают в связи с физиологическими особенностями испытателя, качеством его работы и опытом.

Физиологические особенности наблюдателя связаны с его внимательностью, состоянием зрения, слуха и т.д., они проявляются в скорости реакции на сигналы при исполнении команд к началу и окончанию замера, в промахах в отсчете, записи и т.п. Поэтому желательно, чтобы определенные наблюдения поручались, по возможности, одному и тому же лицу.

Субъективные погрешности зависят также от индивидуальной оценки показаний прибора и, в частности, от положения наблюдателя относительно прибора в момент отсчета. Поскольку стрелка указателя чаще всего не совпадает с плоскостью шкалы, то в случаях, когда луч зрения наблюдателя направлен не по нормали, а под некоторым углом к шкале, возможна дополнительная погрешность

отсчета. Такую погрешность называют *параллаксом*. Чтобы уменьшить влияние параллакса, стрелку смещают ближе к шкале. В более точных приборах шкалу снабжают зеркальной вставкой (рис. II.4). В этом случае наблюдатель должен смотреть так, чтобы стрелка совпала с ее изображением в зеркале. Тогда параллакс сводится к нулю.

На точность отсчета показаний, кроме всего, влияют форма и размеры стрелки и штрихов на шкале. Оптимальной считают толщину их, равную примерно $1/10$ деления шкалы. ГОСТ требует также, чтобы цена деления между оцифрованными отметками шкалы была кратна единице, двум или пяти единицам.

Субъективные ошибки полностью исключают с помощью приборов, обеспечивающих автоматическую запись измеряемых величин или цифровую индикацию результатов измерений, хотя и здесь ошибки считывания возможны.

Явные промахи и просчеты, приводящие к появлению грубых ошибок при обычных методах измерения, не принимают во внимание, а в сомнительных случаях проводят контрольные измерения.

§ II.3. Построение графиков по данным наблюдений

Первичную оценку экспериментального обследования двигателей обычно проводят с помощью графического изображения результатов наблюдений. К этому способу прибегают иногда непосредственно в ходе испытаний с тем, чтобы увереннее ориентироваться в проведении эксперимента.

В сравнении с табличным, графическое изображение отличается наглядностью и легкостью обозрения результатов испытаний. По графику всегда можно определить также величину функции для любых промежуточных значений аргумента, не вошедших в протокольные данные. Иными словами, испытателю предоставляется широкая возможность использования метода графической интерполяции и даже экстраполяции*. Однако графическому изображению свойственна невысокая степень точности. Это и понятно, поскольку графики, или так называемые характеристики, строят по точкам, соединяя их предварительно от руки в общем случае плавной кривой линией**, и тщательно потом улучшают ее по лекалу, стремясь возможно полнее выявить закономерность изменения исследуемого параметра двигателя.

Построение характеристик выполняют так, чтобы плавная линия, а если допустимо — прямая, проходила через возможно большее число точек. Чем меньше при этом «выпадает» точек, тем, следовательно, тщательнее было проведено испытание, обеспечившее

* Происходят от латинских «интер» — внутри, «экстра» — снаружи, «полюс» — точка.

** Отсюда следует бытующее еще определение, что характеристика представляет собой кривую изменения одного параметра в зависимости от другого.

минимальный «разброс» точек. Построение характеристики не допускается путем соединения точек прямыми отрезками, образующими ломаную линию, если для этого нет особых причин. Линия не должна также закрывать собой экспериментально полученные точки. Наоборот, графики производных величин, определяемых методом расчета по формулам, строят в виде сплошной линии так, чтобы линия в этом случае полностью закрывала расчетные точки, по которым строит графическую зависимость.

Масштабы по возможности выбирают кратными числу клеток миллиметровой бумаги стандартного формата, на которой удобнее всего строить графики. При этом следует рациональнее использовать поле формата, не допускать скученности кривых и по возможности избегать излишних пересечений линий. В каждом конкретном случае принятый масштаб должен способствовать возможно полному выявлению действительной взаимосвязи между исследуемыми величинами, иначе графическое изображение не достигает цели.

Для построения графиков следует применять листы только форматов, установленных в СССР единой системой конструкторской документации (ЕСКД), обязательной с 1971 г.

§ II.4. Обработка и анализ экспериментальных данных

Конечная цель измерений и экспериментальных обследований заключается в нахождении наиболее вероятной числовой величины объекта измерения или изучаемого параметра и, если возможно, в установлении математических зависимостей, которые наилучшим образом описывают закономерности изменения исследуемых факторов в данных условиях опыта. Тогда как графики, построенные непосредственно по протокольным записям наблюдений и результатам первичной обработки, отражают иногда субъективность испытателей, их опыт и следы невыявленных ошибок измерений, что снижает достоверность выводов и обобщений.

Для оценки правильности и общей пригодности экспериментальных данных применяют известные методы теории случайных ошибок измерений и другие положения математической статистики. Математическая обработка результатов наблюдений совершенно необходима в случаях, когда между исследуемыми параметрами нет явной функциональной связи, но возможна вероятностная, так называемая корреляционная зависимость, осуществляемая лишь в среднем вследствие сложного характера взаимного влияния факторов, которые нельзя почему-либо учесть в экспериментальном исследовании [17, 20, 21, 54, 67].

В указанной литературе и в некоторых пособиях по испытаниям двигателей [55, 58] приведены общие доказательства применимости отдельных методов обработки результатов наблюдений и рассмотрены числовые примеры. В данном курсе из-за ограниченности объема даны только основные положения и расчетные уравнения для обработки и анализа экспериментальных материалов.

Известно, что неустранимость случайных ошибок измерений исключает в самом принципе возможность получения истинного значения любой измеряемой физической величины A . Иными словами, как объект измерения, A всегда остается для нас неизвестной величиной x . Поэтому в практике обработки результатов вынужденно пользуются не истинным, а вероятным значением измеряемой величины.

Вероятное значение измеряемой величины x определяют как среднюю арифметическую величину из всех выполненных n отдельных равноточных измерений одного и того же численного значения физической величины. Следовательно, наиболее вероятное значение измеряемой физической величины

$$\bar{x} = \sum_1^n x_i / n,$$

где $\sum_1^n x_i$ — сумма величин, получаемых при измерении.

Точность и надежность измерений оценивают по значениям относительных ошибок путем сопоставления абсолютной величины ошибки измерения с самой измеряемой величиной, с учетом доверительной вероятности.

Абсолютные ошибки Δx , представляющие в общем случае разность между искомой величиной и результатами ее измерения, действительно не могут исчерпывающе характеризовать точность измерений, поскольку зависят от численного значения самой измеряемой величины. А поскольку истинное значение измеряемой величины вообще остается неизвестным, то для практических расчетов принимают во внимание ее вероятное значение

$$\Delta x_i = \bar{x} - x_i.$$

При этом учитывают, что возможности получения ошибок со знаком плюс и со знаком минус одинаковы и сумма всех случайных ошибок, следовательно, близка к нулю.

Показателями точности измерений служат величины средней квадратичной, вероятной и средней ошибок.

Средняя квадратичная ошибка σ отдельного измерения

$$\sigma = \pm \sqrt{\sum_1^n \Delta x_i^2 / (n - 1)},$$

где $\sum_1^n \Delta x_i^2$ — сумма квадратов отклонений результатов отдельных измерений от их среднего арифметического значения.

Заметим, что относительную величину средней квадратичной ошибки, выраженную в процентах, называют *коэффициентом вариации*:

$$\omega = (\sigma / \bar{x}) 100.$$

Вероятная ошибка r отдельного измерения находится в предположении, что все случайные ошибки данного ряда n измерений разделены на две равные части: в одной ошибки $> r$, в другой $< r$. Поэтому расчетная формула принимает вид

$$r = \pm 0,6745 \sqrt{\sum_1^n \Delta x_i^2 / (n-1)} \approx (2/3) \sigma,$$

где $0,6745 \approx 2/3$ — коэффициент перехода от σ к r .

Средняя арифметическая ошибка r_n отдельного измерения определяется как средняя арифметическая абсолютных величин $|\Delta x_i|$ всех случайных ошибок из n измерений

$$r_n = \sum_1^n |\Delta x_i| / n.$$

При малом n рекомендуется применять формулу [20]

$$r_n = \sum_1^n |\Delta x_i| / \sqrt{n(n-1)}.$$

Между r_n и σ существует определенная зависимость

$$r_n = \sqrt{2/\pi} \sigma \approx 0,8\sigma.$$

Точность измерений можно оценивать по величинам любой из рассмотренных ошибок σ , r и r_n , поскольку в случаях достаточно большого n при нормальном законе распределения ошибок они связаны между собой указанными выше коэффициентами перехода. Поэтому на практике следует определять ту из ошибок, расчеты которой менее трудоемки. Очевидно, целесообразнее вычислять среднюю ошибку r_n .

Однако в случаях, когда измерения выполняют с помощью хорошо исследованного метода, для которого величина σ заранее известна, а также при малых n точность результатов предпочтительнее оценивать по средней квадратичной ошибке. Тогда по таблицам Стьюдента [20, 28] сравнительно легко можно определить доверительную вероятность и, следовательно, степень надежности измерений при ограниченном числе n . Но поскольку на практике погрешности метода чаще всего приходится оценивать в процессе измерений по небольшому числу n (иногда всего по двум измерениям), то в расчетах принимают не величину σ , выявляемую вследствие большого числа измерений, а иное значение средней квадра-

тичной ошибки, обозначаемой через s_n , которое только в пределе стремится к σ^* . По аналогии с σ

$$s_n = \pm \sqrt{\sum_1^n \Delta x_i^2 / (n-1)}.$$

Доверительная вероятность, или коэффициент надежности, α определяется в предположении, что результаты измерений отличаются от искомого истинного значения измеряемой физической величины на величину, не превосходящую заданного Δx , и записывают это в следующем виде:

$$p(\bar{x} - \Delta x < x < \bar{x} + \Delta x) = \alpha.$$

Данное соотношение означает, что с вероятностью, равной α , результат измерений не выходит за пределы так называемого *доверительного интервала* от $x - \Delta x$ до $x + \Delta x$. Видимо, чем большая требуется надежность оценки, тем больше будет и доверительный интервал. Наоборот, чем шире задается доверительный интервал, тем вероятнее, что результаты измерений не выйдут за его пределы. Знание доверительной вероятности и позволяет оценивать степень надежности результатов измерений.

Таким образом, для нахождения случайной ошибки нужно определить два параметра — доверительный интервал и доверительную вероятность. Полезно помнить, что средней квадратичной ошибке σ при нормальном законе распределения соответствует доверительная вероятность 0,68, ее значению 2σ — 0,95 и для 3σ , т. е. для трехсигмового значения, — 0,997. Знание этих граничных величин α достаточно, чтобы быстро ориентироваться в оценке надежности измерений, если известна их средняя квадратичная ошибка или коэффициент вариации [20].

Ошибки среднего арифметического взаимосвязаны с ошибками отдельных измерений следующими соотношениями:

$$\sigma_{\bar{x}} = \pm \sigma / \sqrt{n} \quad \text{и} \quad r_{\bar{x}} = \pm r / \sqrt{n},$$

где $\sigma_{\bar{x}}$ — средняя квадратичная и $r_{\bar{x}}$ — вероятная ошибка среднего арифметического измеряемой физической величины A .

Легко установить, что при увеличении числа n измерений ошибки среднего арифметического непрерывно и резко уменьшаются, но, начиная от $n = 8 \div 10$, такое уменьшение становится незначительным. Данными пределами и ограничивают количество измерений, а в случае неудовлетворительной точности переходят на более совершенные методы измерений. Тем не менее, когда $n < 20$, в расчеты вводят поправочный коэффициент Стьюдента, равный

$$t_\alpha = \Delta x \sqrt{n} / s_n,$$

* Если σ^2 — генеральная, то s_n — выборочная дисперсия, т. е. степень рассеивания нормального распределения случайной величины. При замене s_n величиной σ надежность оценки уменьшается и тем заметнее, чем меньше n .

и окончательный результат всей серии из n измерений в общем случае определяют по формуле

$$x = \bar{x} \pm t_{\alpha} \sqrt{\sum_1^n \Delta x_i^2 / [n(n-1)]}.$$

При конечном n величину $\bar{x}$ в теории вероятностей называют *выборочным средним*, или *средним выборки* (в отличие от генерального среднего при $n \rightarrow \infty$), что означает — взято наугад n значений из бесконечного множества (генеральной совокупности) возможных значений.

Ошибки косвенных измерений находят из условия, что числовое значение определяемой физической величины является функцией или одного, или ряда независимых переменных, т. е.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n),$$

где x_i — независимая переменная величина, которую необходимо измерить, чтобы по полученным результатам определить числовое значение функции y .

При несколько упрощенной трактовке, полагая величины абсолютных ошибок Δx_i прямых измерений независимых переменных x_i очень малыми по сравнению с измеряемыми величинами, можно считать

$$\Delta x_i \approx dx_i \text{ и } \Delta y \approx dy,$$

где dx_i и dy — дифференциалы независимых переменных и их функции; Δy — изменение функции при бесконечно малых изменениях Δx_i независимых переменных, т. е. абсолютная ошибка косвенного измерения.

Ошибки в определении функции одного независимого переменного находят тогда следующим образом. Пусть искомая величина y определяется из прямых измерений величины x , причем $y = f(x)$ и, следовательно,

$$\bar{y} + \Delta y = f(\bar{x} + \Delta x),$$

где $\bar{y} = f(\bar{x})$.

Раскладывая правую часть предпоследнего уравнения в ряд Тейлора и пренебрегая членами, содержащими Δx^2 и более высокие степени Δx , получим

$$\bar{y} + \Delta y = f(\bar{x}) + \Delta x \cdot f'(\bar{x}),$$

или

$$\Delta y = \Delta x \cdot f'(\bar{x}).$$

Относительная ошибка

$$\varepsilon_y = \frac{f'(\bar{x})}{f(\bar{x})} \Delta x = \frac{f'(x) dx}{f(x)} = \frac{df(x)}{f(x)},$$

т. е.

$$\varepsilon_y = d \ln f(x),$$

где знак d после дифференцирования следует заменить на Δ .

Ошибки в определении функции нескольких независимых переменных x_i находят аналогично изложенному выше. Принимая во внимание, что $x_1 = \bar{x}_1 - \Delta x_1$, $x_2 = \bar{x}_2 - \Delta x_2$, ... $x_n = \bar{x}_n - \Delta x_n$, т. е. $x_i = \bar{x}_i - \Delta x_i$, и учитывая малость ошибок Δx_i , получают в первом приближении следующее расчетное уравнение:

$$\Delta y = \sqrt{\sum_1^n [(\partial f / \partial x_i) \Delta x_i]^2},$$

где $\partial f / \partial x_i$ — частные производные функции $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Заметим, что данная формула сохраняет свой вид, если вместо ошибки Δ мы возьмем среднеарифметические r_n или среднеквадратичные σ ошибки.

Располагая величинами абсолютных ошибок, находят относительные ошибки из соотношения

$$\varepsilon_y = (\Delta f / f) 100.$$

Ошибки в определении некоторых функций можно найти по формулам, приведенным в табл. II.1 и II.2.

Таблица II.1

Вид функции $y = f(x)$	Ошибки в определении функции	
	Абсолютная, Δy	Относительная, $\Delta y / y$
ax	$a\Delta x$	$\frac{\Delta x}{x}$
a^n	$n \bar{x}^{n-1} \Delta x$	$n \frac{\Delta x}{\bar{x}}$
$\frac{x}{1+x}$	$\frac{\Delta x}{(1+\bar{x})^2}$	$\frac{\Delta x}{\bar{x}(1+\bar{x})}$
$\frac{x}{1-x}$	$\frac{\Delta x}{(1-\bar{x})^2}$	$\frac{\Delta x}{\bar{x}(1-\bar{x})}$
$\sqrt[n]{x}$	$\frac{1}{n} \cdot \frac{\sqrt[n]{\bar{x}}}{\bar{x}} \cdot \Delta x$	$\frac{1}{n} \cdot \frac{\Delta x}{\bar{x}}$
$\ln x$	$\frac{\Delta x}{\bar{x}}$	$\frac{\Delta x}{\bar{x} \ln \bar{x}}$

Пригодность экспериментальных данных в простейшем случае можно определить и отбросить как промах, исходя из того, что большие ошибки имеют малую вероятность. Однако такой подход к результатам измерений нельзя считать полностью правомерным, так как отклонения могут быть и оправданными. Для обоснованного решения этого вопроса необходимо располагать величиной ошибки σ , которая и характеризует размах случайных колебаний результатов

Вид функции $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$	Ошибки в определении функции	
	Абсолютная, Δy	Относительная, $\Delta f/f$
$ax_1 + bx_2 + cx_3$	$\sqrt{a^2 \Delta x_1^2 + b^2 \Delta x_2^2 + c^2 \Delta x_3^2}$	$\frac{\sqrt{a^2 \Delta x_1^2 + b^2 \Delta x_2^2 + c^2 \Delta x_3^2}}{a\bar{x}_1 + b\bar{x}_2 + c\bar{x}_3}$
$ax_1 - bx_2$	$\sqrt{a^2 \Delta x_1^2 + b^2 \Delta x_2^2}$	$\frac{\sqrt{a^2 \Delta x_1^2 + b^2 \Delta x_2^2}}{a\bar{x}_1 - b\bar{x}_2}$
$x_1 x_2 x_3$	$\sqrt{\bar{x}_2^2 \bar{x}_3^2 \Delta x_1^2 + \bar{x}_3^2 \bar{x}_1^2 \Delta x_2^2 + \bar{x}_1^2 \bar{x}_2^2 \Delta x_3^2} \dots \rightarrow$	$\sqrt{\frac{\Delta x_1^2}{\bar{x}_1^2} + \frac{\Delta x_2^2}{\bar{x}_2^2} + \frac{\Delta x_3^2}{\bar{x}_3^2}}$
$\frac{x_1}{x_2}$	$\sqrt{\frac{\Delta x_1^2}{\bar{x}_2^2} + \frac{\bar{x}_1^2 \Delta x_2^2}{\bar{x}_2^4}}$	$\sqrt{\frac{\Delta x_1^2}{\bar{x}_1^2} + \frac{\Delta x_2^2}{\bar{x}_2^2}}$
$\frac{x_1}{x_1 + x_2}$	$\frac{\sqrt{\bar{x}_2^2 \Delta x_1^2 + \bar{x}_1^2 \Delta x_2^2}}{(\bar{x}_1 + \bar{x}_2)^2}$	$\frac{\sqrt{\bar{x}_2^2 \Delta x_1^2 + \bar{x}_1^2 \Delta x_2^2}}{\bar{x}_1 (\bar{x}_1 + \bar{x}_2)}$
$\frac{x_1}{x_1 - x_2}$	$\frac{\sqrt{\bar{x}_2^2 \Delta x_1^2 + \bar{x}_1^2 \Delta x_2^2}}{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)^2}$	$\frac{\sqrt{\bar{x}_2^2 \Delta x_1^2 + \bar{x}_1^2 \Delta x_2^2}}{\bar{x}_1 (\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}$
$x_1 (x_2 + x_3)$	$\sqrt{(\bar{x}_2 + \bar{x}_3)^2 \Delta x_1^2 + \bar{x}_1^2 (\Delta x_2^2 + \Delta x_3^2)}$	$\frac{\sqrt{(\bar{x}_2 + \bar{x}_3)^2 \Delta x_1^2 + \bar{x}_1^2 (\Delta x_2^2 + \Delta x_3^2)}}{\bar{x}_1 (\bar{x}_2 + \bar{x}_3)} \dots \rightarrow$

измерений. Как известно из теории вероятностей, при нормальном распределении за трехсигмовые пределы выходят менее 0,003 всего числа измерений, т. е. ничтожно малая их доля. Поэтому, когда результат конкретного измерения отклоняется от средней арифметической величины $\bar{x}$ более, чем на 3σ , или равен этой величине, то он может быть отброшен как маловероятный, появившийся вследствие грубой ошибки (промаха).

Функциональная зависимость, если таковая вообще существует между исследуемыми величинами, может быть выявлена и математически оформлена известными способами средних или с применением интерполяционных формул, графически и по способу наименьших квадратов [21, 67] при условии, что экспериментальные данные позволяют построить вполне четкое графическое изображение результатов измерений. Функциональную связь находят в форме

алгебраических выражений, которые принято называть *эмпирическими формулами*.

Практически задачу сводят к построению графиков по экспериментальным данным, проверенным на надежность, и нахождению математической формулы, наилучшим образом описывающей полученную закономерность. Но прежде чем определить общий вид такой формулы, полезно установить, какой характер имеет исследуемая кривая при значениях аргумента, близких к нулю, проходит ли она через начало координат, пересекает ли координатные оси и т. д. Затем, используя результаты опыта, определить уже значения постоянных (коэффициентов) этой формулы. Чаще всего исследования принятой (предполагаемой) функции осуществляют по способу наименьших квадратов, имеющему преимущества и большую точность по сравнению с другими приемами.

Способ наименьших квадратов основан на том, что в оптимальном случае, т. е. для более достоверной кривой, сумма квадратов отклонений Δx должна быть наименьшей: $\sum \Delta x^2 = \min$, тогда и кривая расположится наиболее близко ко всем экспериментальным точкам. Стремление провести кривую обязательно через все нанесенные на поле графика экспериментально полученные точки чаще всего дает ломаную линию, а это лишь затрудняет выявление искомой функциональной связи между исследуемыми величинами.

Пусть x_i — точки на абсциссе графика, соответствующие величинам независимого переменного исследуемого фактора (параметра), y_i — ординаты этих точек, полученные в результате n измерений, а искомая функциональная связь между ними $y=f(x)$ явно описывается уравнением прямой вида

$$y = ax + b.$$

Чтобы найти оптимальные значения коэффициентов a и b , проводят ординаты точек y_i до их пересечения с предполагаемой искомой прямой, а поскольку значения этих ординат не что иное, как $ax_i + b$, то расстояние по ординате от точек y_i до прямой будет равно $ax_i + b - y_i$, т. е. отклонениям Δx_i .

Согласно изложенному ранее, для лучшей, наиболее подходящей, кривой должно быть соблюдено условие:

$$\sum \Delta x_i^2 = \sum (ax_i + b - y_i)^2 = \min.$$

Используя далее методы дифференциального исчисления, получают следующие расчетные уравнения, позволяющие определять оптимальные величины искомых коэффициентов:

$$a = \frac{n \sum_1^n x_i y_i - \sum_1^n x_i \sum_1^n y_i}{n \sum_1^n x_i^2 - \left(\sum_1^n x_i \right)^2};$$

$$b = \frac{\sum_1^n x_i^2 \sum_1^n y_i - \sum_1^n x_i \sum_1^n x_i y_i}{n \sum_1^n x_i^2 - \left(\sum_1^n x_i \right)^2}.$$

Если искомая функция нелинейна, то стремятся выразить ее через линейные зависимости. Так, в случае $y = k/x + b$ вводят новую переменную $z = 1/x$ и получают линейную связь между y и z ; при $y = ab^x$ путем логарифмирования устанавливают линейную связь между x и $\lg y$; в более сложных вариантах, например, $y = ax + bx^2$ все члены следует разделить на x , а в полученном $y/x = a + bx$ положить $y/x = z$, тогда $z = a + bx$, т. е. получаем линейную зависимость z от x и т. д. Таким образом, оперируя с линейной зависимостью, находят оптимальные значения нужных коэффициентов для довольно большого числа различных закономерностей [54, 67].

Однако способ наименьших квадратов, как и другие известные способы, не позволяет устанавливать, какого вида функция лучше всего аппроксимирует данные экспериментальные точки, т. е. однозначно не выражает искомую функцию через другие, более простые математические зависимости. Получают лишь ответ, какая из прямых, экспонент или, например, парабол, является лучшей прямой, экспонентой или параболой. Поэтому и прибегают иногда к опробованию нескольких видов исходных формул, рассчитывая их коэффициенты на ЭВМ.

Методы теории корреляции применяют, когда две величины x и y не связаны между собой функциональной зависимостью, но имеют вероятностную связь. Эта связь появляется обычно тогда, когда имеются общие случайные факторы, влияющие как на одну, так и на другую величину, наряду с другими неодинаковыми для обеих величин случайными факторами [17, 21, 54]. Например,

$$x = f(z_1, z_2, \dots, z_n; v_1, v_2, \dots, v_m);$$

$$y = \varphi(z_1, z_2, \dots, z_n; u_1, u_2, \dots, u_k).$$

При такой зависимости между x и y имеет смысл говорить о законе распределения этих величин, о вероятности, с которой встречаются те или иные комбинации их значений. Для этого рассматривают функции, которые образует математическое ожидание одной величины при различных фиксированных значениях другой. Указанные функции носят название *регрессий*, и их графическое изображение на плоскости (x, y) (линии регрессий) представляет геометрическое место центров условных распределений (центров масс), соответствующих заданным значениям одной из переменных [54].

Наряду с линиями регрессий рассматривают и линии условных дисперсий, которые служат мерой рассеивания одной величины при фиксированных значениях другой.

Анализируя указанные зависимости, можно решить задачу обоснованного прогноза, т. е. найти пределы, в которых с наперед

заданной надежностью содержится интересующая нас величина, если другие связанные с ней величины получают определенное значение.

Наиболее простыми и важными случаями линий регрессий являются прямые линии и соответствующие им уравнения регрессий y по x и x по y [39, 54]. Характеристикой связи между величинами x и y в этом случае служит момент связи μ_{xy} , а показателем последнего — безразмерный коэффициент, называемый *коэффициентом корреляции*,

$$r_{xy} = \mu_{xy} / (\sigma_x \sigma_y),$$

где σ_x и σ_y — средние квадратичные отклонения.

Численную величину коэффициента линейной корреляции можно определить по формуле [21]

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}},$$

где $\bar{x} = \sum x_i / n$; $\bar{y} = \sum y_i / n$; n — число испытаний (измерений).

Основные свойства коэффициента линейной корреляции заключаются в том, что величина его не выходит за пределы ± 1 , которые он достигает только в случаях, когда между x и y имеется точная и притом линейная зависимость. Если $|r| < 1$, то он утрачивает эти свойства. Тем не менее, по мере приближения $|r|$ к единице, его с некоторым основанием все-таки считают мерой, близкой к полной линейной зависимости между x и y . В случаях $r = 0$ говорят, что x и y не коррелированы и, стало быть, независимы [54].

Если $|r|$ сильно отличается от единицы (и особенно, когда $r = 0$), величины x и y целесообразно исследовать на нелинейную корреляционную зависимость. Для нахождения последней используют ЭВМ, с помощью которой подбирают наиболее подходящее аппроксимирующее уравнение, дающее наибольшее приближение к кривой регрессии.

В практике исследований возникает необходимость устанавливать наличие связей между тремя и большим числом физических величин, положим z , x и y , зависящих от общих и неодинаковых для них случайных факторов. Тесноту связи в этом случае оценивают *совокупным*, или *множественным*, *коэффициентом корреляции*

$$R_{z,xy} = \sqrt{\frac{r^2(x, y) + r^2(y, z) - 2r(x, z)r(y, z)r(x, y)}{1 - r^2(x, y)}}.$$

Коэффициент $R_{z,xy}$ может принимать значения: $0 \leq R_{z,xy} \leq 1$. При $R_{z,xy} = 0$ между z и x и y отсутствует линейная зависимость; при $R_{z,xy} = 1$ величина z находится в линейной функциональной за-

зависимости от x и y , выражаемой, например, уравнением:

$$z = ax + by + c.$$

Влияние величины x (или y) на изменение z оценивают *частным коэффициентом корреляции*

$$r_y(z, x) = \frac{r(x, z) - r(y, z)r(x, y)}{\sqrt{[1 - r^2(x, y)][1 - r^2(y, z)]}}.$$

Аналогично определяют $r_x(z, y)$. Частные коэффициенты корреляции обладают теми же свойствами, что и коэффициенты линейной корреляции.

ГЛАВА III
ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ
ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДВИГАТЕЛЕЙ

§ III.1. Возможности автоматизации
информационных процессов

Под информационными процессами понимают восприятие, передачу, обработку и представление информации о тех или иных изучаемых объектах и явлениях. В исследованиях автомобильных и тракторных двигателей для получения и накопления нужной информации широко применяют как отдельные приборы, так и целые измерительные и управляющие системы, звенья которых основаны на использовании средств механики, химии, акустики, оптики, электро- и радиотехники, электроники, свойств радиоактивных изотопов, спектрального анализа и т. д. Очевидно, по быстродействию, точности, возможностям дистанционного наблюдения и другим свойствам, столь важным в автоматизации процессов информации, перечисленные средства далеко неравноценны. Следовательно, неравноценны и базирующиеся на них отдельные группы приборов и звенья измерительных систем.

Так, механические приборы и образуемые из них измерительные системы, в которых измеряемая неэлектрическая величина не преобразуется в электрическую с целью усиления или дистанционной передачи к выходному звену, как отмечалось ранее, не пригодны для обследования быстроизменяющихся величин. Вследствие инерционности такие системы являются своего рода механическими фильтрами низких частот, громоздки и недостаточно точны, что ограничивает область их применения.

Поэтому в исследованиях быстроходных двигателей вообще и тем более в автоматизированных системах применяют электрические, электронные и сравнимые с ними электромеханические приборы, аппараты и устройства, позволяющие создавать безынерционные измерительные системы. Такие системы, как и отдельные измерительные приборы, представляют собой совокупность взаимосвязанных преобразователей измеряемой физической величины, а чаще всего ряда величин, показателей или параметров, в форму, удобную для передачи, обработки и документирования, включая машинные методы.

В настоящее время отечественная промышленность и ряд известных зарубежных фирм (Orion, Ono-sokki, RFT и др.) выпускают специализированные системы АСИД для лабораторий двигателей,

позволяющие частично или полностью автоматизировать многие виды измерений и даже некоторые типовые испытания. Вместе с тем в практике испытания двигателей широко используют и отдельные измерительные системы, комплектуемые из приборов, аппаратов и устройств общего назначения. Такие системы строят иногда по простейшей структурной схеме с выходными, промежуточными и выходными звеньями прямого преобразования. Однако системы с прямым преобразованием имеют сравнительно малую точность, поскольку погрешности отдельных звеньев системы накладываются на конечные результаты. Чтобы повысить точность, применяют более сложные системы с обратными связями, обеспечивающими измерения по нулевому или дифференциальному методам путем электрической компенсации выходного сигнала с датчика или же путем компенсации самой неэлектрической измеряемой величины такой же физической величиной.

Способ компенсации выбирают с учетом возможностей датчика. В случаях приемлемой точности датчика (положим, не ниже $\pm 1\%$) можно ограничиваться электрической компенсацией выходного сигнала с преобразователя первичного звена по схеме *а* (рис. III.1), имеющей цепь прямого преобразования (преобразователь недокомпенсации) и обратного преобразования (цепь обратной связи). В результате преобразователь недокомпенсации выявляет величину и знак дисбаланса схемы сравнения и выдает сигнал в цепь обратной связи с целью компенсации этого дисбаланса до получения со схемы сравнения нулевого выходного сигнала, как, например, в автоматических электронных потенциометрах (см. гл. VII). Тогда характеристики звеньев, через которые проходит сигнал дисбаланса, не оказывают влияния на конечные результаты измерений и точность последних предопределяется только датчиком.

Если же в силу определенных обстоятельств датчик не обеспечивает желаемую точность, применяют схему *б*, позволяющую компен-

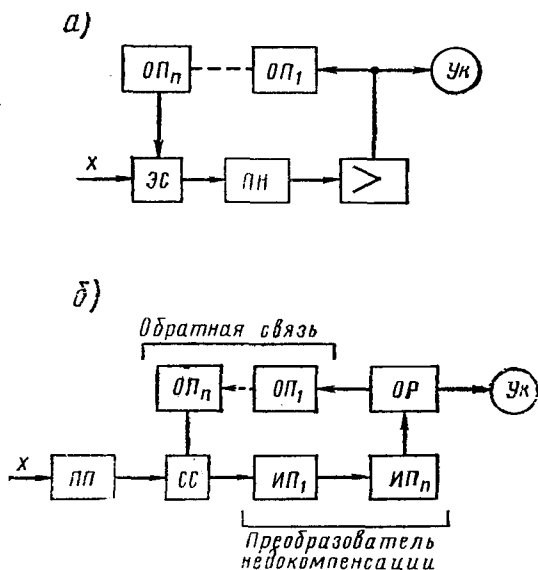


Рис. III.1. Структурные схемы измерительных систем с обратными связями:

а — с электрической компенсацией выходного сигнала с $ПП$; *б* — с компенсацией непосредственно входной неэлектрической величины; $ПП$ — первичный преобразователь; Σ — схема сравнения; $ИП_1, \dots, ИП_n$ — измерительные преобразователи; $ОП_1, \dots, ОП_n$ — обратные преобразователи; Σ — элемент сравнения; $ПН$ — преобразователь недокомпенсации; $ОР$ — орган регулировки; $УК$ — указатель

сировать непосредственно сигнал входной неэлектрической величины, вследствие чего через сам датчик, точнее через его преобразователь, проходит лишь сигнал дисбаланса между двумя однородными физическими величинами, как например, в электропневматическом индикаторе МАИ (см. гл. XI).

Системы, построенные по схеме б, отличаются наиболее высокой точностью измерений, но им свойственна и большая сложность. Это учитывают при выборе структурной схемы для конкретной измерительной системы. Нужды типовых испытаний вполне можно удовлетворить и простейшими схемами с прямым преобразованием.

Таким образом, структурная схема системы и точность измерений предопределяются свойствами и возможностями датчика, но это не характеризует еще общий уровень автоматизации измерений. Завершается автоматизация конечным звеном системы, фиксирующим результаты измерений, которые могут быть выданы либо в виде материалов, требующих дообработки, либо в форме, например, коэффициентов корреляции или соответствующих показателей, позволяющих непосредственно оценивать искомые функциональные или корреляционные связи между исследуемыми физическими величинами.

Далее кратко рассмотрены составные звенья измерительных приборов, аппаратов и систем общего назначения. Более подробные сведения приведены в литературе [26, 45, 60, 61, 62, 68] и частично в последующих главах курса.

§ III.2. Преобразователи неэлектрических величин в электрические. Датчики

Подавляющее большинство измерений в двигателях внутреннего сгорания связано с необходимостью преобразования неэлектрических физических величин в электрические либо непосредственно, либо путем предварительного преобразования их в другие неэлектрические параметры, например в импульс света или иной параметр, косвенный для исследуемой величины. Поэтому различают датчики косвенного и прямого преобразования, причем последние разделяют еще на параметрические и генераторные.

К параметрическим относят датчики, в которых входная неэлектрическая величина, действуя на участок электрической цепи, питаемой от внешнего источника э. д. с., вызывает изменение соответствующего электрического параметра, как-то: сопротивления R , емкости C , индуктивности L или взаимной индуктивности M .

К генераторным относят датчики, преобразователи в которых под действием входной неэлектрической величины становятся источником э. д. с., генерируя в том числе термо-э. д. с и пьезоэлектрический эффект.

При выборе датчика (преобразователя) отдают предпочтение датчикам, обладающим линейной функцией преобразования, т. е. имеющим линейную характеристику и отличающимся большой чувстви-

тельностью и разрешающей способностью, быстроедействием и малыми габаритами, позволяющими размещать их в труднодоступных зонах двигателя. Важно, чтобы датчики не мешали нормальному протеканию процесса, были надежны и обеспечивали дистанционность регистрации наблюдений.

Наиболее распространенными датчиками механических величин являются параметрические, особенно R -датчики, т. е. датчики омического сопротивления.

Датчики сопротивления в простейшем случае являются датчиками реохордного типа и представляют собой каркас-изолятор с намотанной на него проволокой высокого сопротивления, по которой перемещают движок-щетку, связанный с измерительной цепью прибора. Реохордные датчики выполняют по схеме реостатов и потенциометров для сравнительно больших перемещений.

В исследовательских целях широко применяют R -датчики, используя свойства различных тензосопротивлений.

Тензосопротивления бывают проволоочные, фольговые и пленочные. Действие их основано на тензоэффекте, характеризующем изменением активного сопротивления проводников при деформации последних.

Электрическое сопротивление (Ом) проводника в зависимости от длины l , сечения s и его физических свойств определяется, как известно, из соотношения

$$R = \rho (l/s).$$

Поэтому, когда проволоку или другой проводник подвергают действию растягивающей силы, то одновременно с изменением ее длины на величину Δl и сечения на Δs изменяется также удельное сопротивление ρ на величину $\Delta \rho$. В результате изменяется и абсолютная величина сопротивления на ΔR . Опыты показывают, что сопротивление проводников в большом диапазоне изменяется пропорционально растягивающей силе, т. е.

$$\Delta R/R = kP,$$

причем такое изменение сопротивления является упругим и после снятия силы P исчезает. Поскольку прилагаемая сила и вызываемые ею деформации пропорциональны, то

$$\Delta R/R = \gamma (\Delta l/l),$$

где γ — константа, называемая *коэффициентом тензочувствительности материала*, по которой оценивают чувствительность тензодатчиков:

$$\gamma = (\Delta R/R)/(\Delta l/l).$$

Значения коэффициента γ для некоторых материалов приведены в табл. III.1. При подборе материала для тензосопротивлений предпочтение отдают материалам с возможно большей величиной коэффициента γ . Необходимость этого диктуется тем, что относительное изменение сопротивления тензочувствительных материалов мало и в пределах упругих деформаций не превышает $(5 \div 7) \cdot 10^{-3}$. Поэтому

Таблица III.1

Материалы	Химический состав, %	Коэффициент тензочувствительности γ	Удельное сопротивление ρ , Ом·мм ² /м	Температурный коэффициент сопротивления α , 1/град	Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_{\text{л}}$, 1/град
Константан	60Cu + 40Ni	1,9 ÷ 2,1	0,46 ÷ 0,50	$\pm 50 \cdot 10^{-6}$	$(14 \div 15) \cdot 10^{-6}$
Нихром . .	80Ni + 20Cr	2,1 ÷ 2,3	0,9 ÷ 1,7	$(150 \div 170) \cdot 10^{-6}$	$14 \cdot 10^{-6}$
Хромель . .	65Ni + 25Fe + 10Cr	2,5	0,7 ÷ 1,1	$(190 \div 500) \cdot 10^{-6}$	$14,8 \cdot 10^{-6}$
Элинвар . .	36Ni + 8Cr + 56Fe	3,2 ÷ 3,5	—	$300 \cdot 10^{-6}$	—
Никель . .	Ni	—12	0,11	$6000 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$

нагрев их может вызвать изменение сопротивления, соизмеримое с рабочим. Желательно, чтобы тензочувствительный материал имел в связи с этим возможно меньший температурный коэффициент сопротивления.

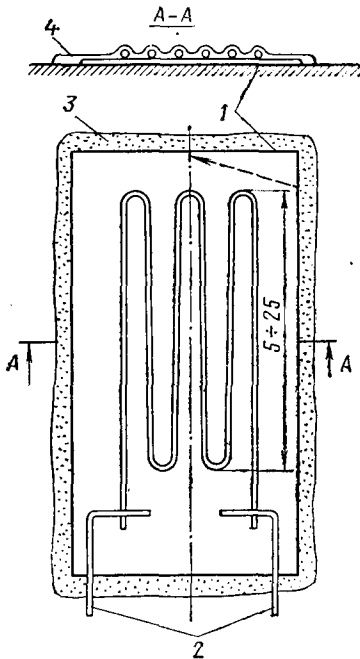


Рис. III.2. Проволочный тензоэлемент сопротивления

Проволочные тензосопротивления преимущественно изготавливают из медноникелевых сплавов типа константана и железоникельхромовых типа элинвара. Первые из них, имеющие небольшой коэффициент линейного расширения и приемлемую тензочувствительность, применяют в установках для статических испытаний. Вторые, имеющие в 50 раз больший температурный коэффициент линейного расширения, но и большую в 1,5 раза чувствительность к механическим воздействиям, — для динамических испытаний, в том числе, для электрических динамометров.

Устройство наиболее распространенных наклеиваемых проволочных тензосопротивлений показано на рис. III. 2. Проволоку диаметром 0,02—0,05 мм, ровными зигзагообразными петлями укладывают на тонкую бумажную полоску 1, покрытую слоем клея 3. К концам проволоки припаивают или приваривают более толстые выводные проводники 2, при помощи которых сопротивление включают в измерительную цепь. Сверху его покрывают защитным слоем 4 лака или заклеивают с этой целью полоской тонкой бумаги, а иногда фетром. В результате получают отдельный

тензочувствительный элемент в виде пакетика, толщиной всего в несколько десятых долей миллиметра.

Фольговые тензосопротивления представляют собой весьма тонкие ленты или круглые пластинки толщиной $4 \div 12$ мкм, из которых часть металла вытравлена с помощью кислоты, а оставшаяся его часть образует решетку с выводами (рис. III.3). Решетка может иметь любой нужный рисунок, что является существенным преимуществом фольговых тензосопротивлений. На рис. III.3, а показан внешний вид такого сопротивления, употребляемого обычно для наклеивания на мембраны приборов, а на рис. III.3, б — фольговый тензочувствительный элемент, наклеиваемый на валы для измерения скручивающего момента.

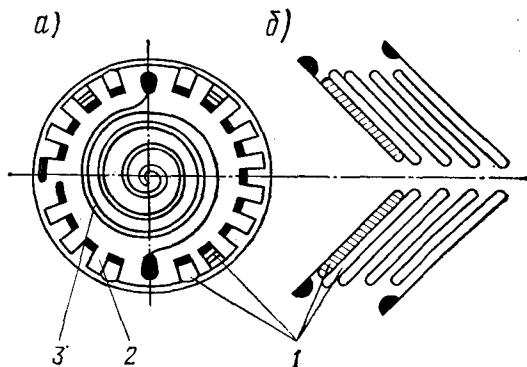


Рис. III.3. Фольговый тензометр сопротивления:

1 — подгоночные петли; 2 — витки, чувствительные к растягивающим усилиям; 3 — витки, чувствительные к сжимающим усилиям

Пленочные тензосопротивления получают путем вакуумной возгонки тензочувствительного материала с последующей конденсацией его на заранее подготовленную подложку, вследствие чего на последней образуется тончайший слой металла, напоминающий пленку. Такой способ обеспечивает массовое изготовление пленочных тензочувствительных элементов. Для пленочных, как и для фольговых тензосопротивлений, помимо материалов, указанных в табл. III.1, применяют соединения германия, кремния и иных полупроводников, а также другие эффективные сплавы. Например, титаноалюминиевый сплав, позволяющий измерять деформации, достигающие до 12%.

Пленочные тензочувствительные элементы часто выполняют в виде одной проводящей полоски, как показано на рис. III.4. Гидисторы, как их называют иногда, упрощают конструкцию чувствительного элемента и имеют другие преимущества, которые рассматриваются ниже.

Тензодатчики, или тензорезисторные датчики, изготовляют путем наклеивания тензочувствительных элементов на поверхность испытуемой детали. Получаемый в результате этого преобразователь практически сливается с испытуемой деталью в единое целое и воспринимает деформации ее поверхностного слоя так же, как волокна самой детали. Входной величиной для такого чувствительного звена прибора является деформация поверхностного слоя детали, а выходной — изменение сопротивления тензочувствительного материала, пропорциональное этой деформации.

Проволочные, пленочные и фольговые тензопреобразователи

имеют ничтожно малую массу, а элементы их совершают микроскопически малые перемещения. Практически они безынерционны в диапазоне частот $0 \div 100$ кГц и позволяют измерять относительные деформации от $0,005 \div 0,02$ до $1,5 \div 2,0\%$.

Для изготовления тензочувствительных элементов и наклеивания их на испытуемый объект применяют различные клеящие составы. При нормальных и повышенных температурах работы используют ацетатно-целлулоидные, бакелитофенольные (БФ) клеи, лаки на основе органических смол и другие клеящие составы; в условиях высоких температур (до 800°C) — кремнийорганические цементы и специальные цементы на основе жидкого стекла.

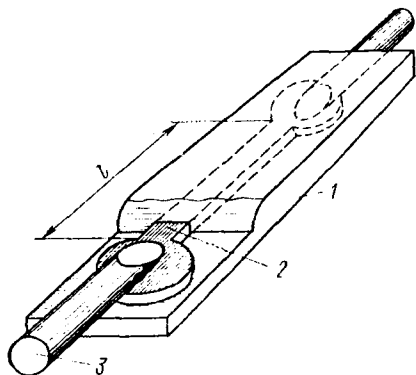


Рис. III.4. Пленочный тензометр сопротивления:

1 — пленка лака; 2 — тензочувствительная пленка; 3 — выводные проводники

Базой тензопреобразователя называют длину участка детали, занимаемого тензосопротивлением. Обычно она составляет $3 \div 25$ мм (l на рис. III.4). Сопротивление тензодатчика выбирают из расчета $30 \div 200$ Ом для статических измерений и $500 \div 1000$ Ом для динамических.

Проводники, припаиваемые к выводам тензопреобразователей, изготавливают из латунной ленты толщиной примерно $0,04$ мм, из медной луженой или же серебряной проволоки диаметром $0,3 \div 0,4$ мм.

Чтобы повысить точность измерения с помощью тензодатчиков, целесообразно увеличивать до возможного максимума силу тока в преобразователе, учитывая, однако, теплопроводность и размеры испытуемой детали. Чем лучше эти показатели, тем благоприятнее условия охлаждения преобразователя и выше бывает допускаемая для него сила тока.

Для преобразователей, выполняемых из константановой проволоки и наклеиваемых на металл, допускают следующую силу тока: 100 мА при диаметре проводника $0,05$ мм; 35 и $12,5$ мА, соответственно, для диаметров $0,025$ и $0,012$ мм. Преобразователи с пленочными и фольговыми тензочувствительными элементами по сравнению с проволоочными находятся в лучших условиях охлаждения и более надежно приклеиваются при сравнительно больших сечениях проводника. Поэтому для фольговых и пленочных преобразователей допускают значительно большую силу тока. Например, для полосок, ширина которых в $10 \div 40$ раз превышает их толщину, силу тока по сравнению с проволоочными проводниками того же сечения можно увеличивать, соответственно, в $1,4 \div 2$ раза.

Недостатком проволоочных преобразователей является и то, что участки проволоки, перпендикулярные к оси их базы, не воспринимают деформации в направлении оси базы, а порождают боковую чув-

ствительность, искажающую базовое напряжение. В связи с этим уменьшение относительной чувствительности проволочного преобразователя по сравнению с чувствительностью исходного материала снижается иногда до 30%. В фольговых и пленочных преобразователях сечение проводника в местах поворота увеличивают до любого желаемого размера, благодаря чему сопротивление этих участков резко снижается, и они не оказывают влияния на чувствительность датчика.

При колебаниях температуры испытуемой детали в наложенном на нее тензосопротивлении могут возникнуть дополнительные деформации и вызвать последующее нежелательное изменение сопротивления преобразователя, что, безусловно, отразится на показаниях прибора.

В самом деле, если α_d и α_n — соответственно температурные коэффициенты линейного расширения материала испытуемой детали и тензочувствительного материала преобразователя, то относительная деформация тензосопротивления

$$\Delta l/l = \alpha_d - \alpha_n.$$

Имея в виду приводившуюся ранее зависимость $\Delta R/R = \gamma (\Delta l/l)$, получим

$$\Delta R/R = \gamma (\alpha_d - \alpha_n).$$

Таким образом, когда коэффициенты линейного расширения материалов преобразователя (α_n) и испытуемой детали (α_d) не одинаковы и $\alpha_n > \alpha_d$, деталь препятствует свободному расширению преобразователя, вследствие чего сопротивление его с повышением температуры уменьшается. Наоборот, при $\alpha_n < \alpha_d$ сопротивление датчика возрастает. Соответственно этому и показания прибора отклоняются от значений, установленных тарировкой.

Температурные погрешности для тензосопротивлений являются самыми существенными. Чтобы исключить их влияние на показания измерительного прибора, в цепь его последовательно с датчиком включают дополнительное сопротивление, подобранное так, что в условиях данных конкретных материалов оно компенсирует изменение сопротивления датчика при колебаниях температуры. Однако на практике распространен более надежный и удобный метод компенсации, основанный на применении двух идентичных тензосопротивлений, из которых одно наклеивается на испытуемую деталь, а второе — на ненагруженную пластину из того же материала, находящуюся в одинаковых с первой температурных условиях. Датчики включают в соседние плечи измерительного моста, благодаря чему автоматически исключают температурные влияния на показания прибора. Еще эффективнее влияние температуры корректируется, когда представляется возможность на испытуемую деталь наклеивать оба преобразователя, подвергающиеся равной деформации разного знака. В этом случае одновременно с температурной коррекцией вдвое повышается также чувствительность измерительной цепи прибора.

Емкостные датчики представляют собой плоские конденсаторы, задающей переменной величиной в которых служит зазор между пластинами или же активная площадь этих пластин. В подавляющем

большинстве их изготавливают с переменным зазором между пластинами. Емкость такого конденсатора

$$C = \varepsilon s / (3,6\pi\delta),$$

где ε — диэлектрическая постоянная; s — площадь одной пластины, см²; δ — величина зазора между пластинами, см.

Отсюда следует, что емкость конденсатора изменяется по гиперболической закономерности при изменении расстояния между пластинами. Поэтому для получения такого преобразователя с линейной характеристикой конденсатор его выполняют с очень малым зазором между пластинами (не более 0,5 мм), который заполняют иногда материалом с высокой диэлектрической постоянной (например, слюдой). Емкостные датчики отличаются высокой чувствительностью (до 500 В/мм) и чаще всего включаются в мостовую измерительную схему.

Емкостные преобразователи с переменным зазором обычно используют для измерения малых перемещений, не превышающих 0,2÷0,4 мм. В этом случае они имеют линейную характеристику, малые погрешности, сравнительно простую конструкцию и очень легкую подвижную часть. Это позволяет применять их в исследованиях сложных быстротекущих процессов в тепловых двигателях.

Индуктивные датчики представляют собой электромагнитные устройства, индуктивность которых изменяется под действием входной неэлектрической величины — перемещения.

Индуктивность L электромагнитной системы с катушкой из w витков выражается соотношением:

$$L = \frac{w^2}{R_M} = \frac{w^2}{R_{M.ст} + R_\delta} = \frac{w^2}{R_{M.ст} + 2\delta/(\mu_0 s)},$$

где R_M — полное сопротивление магнитной цепи; $R_{M.ст}$ — магнитное сопротивление участка из стали; R_δ — магнитное сопротивление воздушных зазоров; δ — величина воздушного зазора; s — площадь воздушного зазора; μ_0 — магнитная проницаемость воздушного зазора, равная $1,26 \cdot 10^{-6}$ Г/м.

Очевидно, индуктивность данной системы можно изменять воздействием на сопротивление R_M магнитной цепи путем изменения параметров δ и s , т. е. величины и площади воздушного зазора. Следовательно, перемещения, связанные с изменением δ и s , являются входной величиной преобразователя, а изменение индуктивности его обмотки — выходной. При этом выходная величина связана, как и в емкостном датчике, с величиной δ воздушного зазора гиперболической зависимостью, вследствие чего линейный участок характеристики индуктивного преобразователя составляет всего 0,1÷0,15 от исходной величины δ_0 воздушного зазора.

Чтобы увеличить линейный участок характеристики, систему составляют из двух преобразователей и включают их в соседние плечи измерительного моста. В этом случае рабочее перемещение подвижного элемента преобразователя возрастает до $(0,3 \div 0,4) \delta_0$. Применение дифференциальных преобразователей уменьшает к тому же погрешности измерения.

Индукционные датчики отличаются тем, что имеют две отдельные обмотки: неподвижную ω_1 , через которую пропускают постоянный ток, и подвижную ω_2 . Когда обмотка ω_2 тоже неподвижна, то э. д. с. на ее зажимах равна нулю, а в случае перемещений обмотки ω_2 под действием измеряемой неэлектрической величины сцепленный с ней магнитный поток Φ изменяется и согласно закону электромагнитной индукции вызывает в обмотке э. д. с.

$$e = -\omega_2 (d\Phi/dt),$$

где $d\Phi/dt$ — скорость изменения магнитного потока, взаимодействующего с витками обмотки.

Поскольку скорость изменения магнитного потока, создаваемого в этих датчиках при помощи постоянных магнитов, определяется скоростью перемещения обмотки ω_2 в воздушном зазоре, то входной величиной для них являются линейные или угловые перемещения этой обмотки.

Индукционные датчики широко используют, например, для измерения частоты вращения валов, вибраций и для других целей, связанных с измерением линейных и угловых перемещений и ускорений.

Пьезоэлектрические датчики основаны на принципе пьезоэлектрического эффекта, который заключается в том, что на некоторых кристаллах (кварц, турмалин, сегнетовая соль, титанат бария и др.) возникают электрические заряды при сжатии или растяжении их в определенных направлениях. При этом получают так называемый «прямой пьезоэффект» в отличие от «обратного пьезоэффекта», вызываемого изменением размеров кристалла под влиянием приложенного заряда.

Наиболее широкое применение имеют кристаллы кварца SiO_2 , представляющие собой шестигранные призмы плотностью $\gamma = 2,65 \text{ кг/м}^3$. В кристаллах кварца различают следующие главные оси (рис. III.5): продольную ось z — z , называемую оптической осью; оси x — x , проходящие через ребра шестигранной призмы нормально к оптической оси, — электрические оси; оси y — y , нормальные к граням, — механические оси. Если из кристалла кварца вырезать пластину, ориентированную параллельно осям x — x и y — y , и подвергнуть ее сжатию или растяжению в направлении электрической оси, то на ее гранях, перпендикулярных электрической оси, возникнут электрические заряды, пропорциональные приложенной силе. При этом заряды на гранях равны, но противоположны по знаку и не зависят от геометрических размеров пластины.

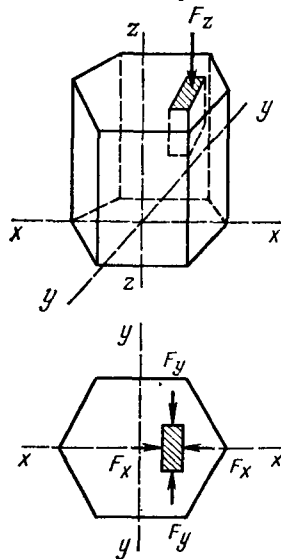


Рис. III.5. Оси кристалла кварца

Под действием силы F_x возникает заряд

$$q = d_1 F_x,$$

где d_1 — постоянный коэффициент, называемый *пьезоэлектрическим модулем*.

В практических расчетах приходится иметь дело с величиной потенциала, до которого заряжается система, состоящая из кварцевого столбика, соединительного кабеля и входного конденсатора усилителя постоянного тока. Для этого случая величина потенциала (В)

$$U = 21 (nF/C),$$

где n — число пластин кварца; F — сила, действующая на кварц, кгс; C — емкость системы, мкФ.

Высокая жесткость кварцевых кристаллов позволяет создавать датчики с частотой собственных колебаний, равной 15–25 кГц. Большое удельное сопротивление кварца $\rho = 2 \cdot 10^{14}$ вынуждает предъявлять повышенные требования к соединительному кабелю и усилителю. В отдельных случаях значительный интерес может представлять титанато-бариевая керамика, имеющая ряд преимуществ перед кварцем (табл. III.2). Недостатком керамики из титаната бария является зависимость пьезоэлектрического модуля от температуры свыше 80°С. В последнее время получены новые пьезокерамические материалы на основе метаниобатов свинца и бария, могущие работать при температурах до 200°С.

Таблица III.2

Кристаллы	Пьезоэлектрический модуль d_1 , Кл/Н	Модуль упругости E , кН/мм ²	Диэлектрическая проницаемость ϵ , Ф/м
Кварц	$2,1 \cdot 10^{-12}$	70–90	$39,8 \cdot 10^{-12}$
Титанат бария	$107 \cdot 10^{-12}$	115	$124 \cdot 10^{-12}$

Фотоэлектрические датчики базируются на преобразовании энергии светового потока в электрическую с помощью различных фотоэлементов. По принципу действия различают фотоэлементы с внешним и внутренним фотоэффектом, вентильные и фотоумножители.

Световой характеристикой фотоэлементов называют зависимость фототока I_Φ от интенсивности светового потока Φ (или освещенности): $I_\Phi = f(\Phi)$, определяющую их чувствительность s . Чувствительность фотоэлементов зависит также от длины волны падающих лучей (спектральная характеристика), частоты изменения светового потока и величины напряжения, приложенного к фотоэлементу (частотная и вольт-амперная характеристики).

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом представляют собой вакуумную или газонаполненную лампу, катод которой испускает электроны под действием светового потока. Фототок вакуумных фотоэлементов прямо пропорционален интенсивности светового потока

Таблица III.3

Обозначение	Тип	Рабочее напряжение, В	Чувствительность	Спектральная характеристика	Максимальная частота модуляции света, кГц	Постоянная времени, с
<i>Фотоэлементы</i>						
СЦВ-3	Сурьмяно-цезиевый вакуумный	240	80 мкА/мВт	Синий	8	—
СЦГ-51	Сурьмяно-цезиевый газонаполненный	180	150 »	Фиолетовый	—	—
ЦВ-1	Кислородно-цезиевый вакуумный	240	20 »	Инфракрасный	—	—
ЦГ-В	Кислородно-цезиевый газонаполненный	240	200 »	»	8	—
Ф-10	Сурьмяно-калиево-натриево-цезиевый вакуумный	100	100 »	Ультрафиолетовый	—	—
<i>Фотоумножители</i>						
ФЭУ-2	1 эмиттер	250	$8 \cdot 10^{-2}$ А/лм	Синий	—	—
ФЭУ-12	12 эмиттеров	1700	5 »	Зеленый	—	—
ФЭУ-13	13 эмиттеров	1400	1000 »	Ультрафиолетовый	—	—
<i>Фоторезисторы</i>						
ФС-А4	Сернисто-свинцовый	4÷40	0,02 А/лм	—	1÷6	$4 \cdot 10^{-5}$
ФС-Б2	Сернисто-висмутовый	30÷60	0,012 »	—	0,1÷0,4	0,04
ФС-К6	Сернисто-кадмиевый	110÷220	1,2 »	—	0,01÷0,1	0,04
<i>Фотодиоды</i>						
ФД-2	Светочувствительная поверхность 1 мм ²	30	10—20 мА/лм	—	—	$1 \cdot 10^{-5}$
ФДК-1	Светочувствительная поверхность 2 мм ²	20	3 »	—	—	$1 \cdot 10^{-5}$
<i>Фототранзисторы</i>						
ФТ-1	Габаритный размер 0,12×7	3	300 мА/лм	—	—	$2 \cdot 10^{-4}$

Чувствительность их составляет 20—100 мкА/лм. Чувствительность газовых элементов достигает 400 мкА/лм, так как вследствие ионизации электронный ток увеличивается.

При измерении слабых световых потоков применяют фотоэлектронные умножители ФЭУ, действие которых основано на вторично-

электронной эмиссии. Пучок электронов, испускаемый фотокатодом под действием светового потока, на пути к аноду-коллектору последовательно направляется к n электродам-эмиттерам (динодам), поверхность которых (покрытая, например, окисью магния) излучает в среднем в m раз больше электронов, чем на нее падает. Чтобы обеспечить это, на каждый диод подают напряжение на 50–100 В выше, чем на предыдущий. При числе каскадов усиления $n \approx 10$ общий коэффициент усиления тока в ФЭУ $K = m^n \approx 10^6 \div 10^{10}$. ФЭУ безынерционны, полоса частот составляет не менее 10^8 Гц.

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом, или фоторезисторы, основаны на том, что сопротивление некоторых полупроводников изменяется под действием светового потока. В связи с этим их называют фотосопротивлением — фоторезисторами.

Фоторезисторы типа ФС-К, работающие в импульсном режиме (менее 1 с), позволяют получать ток до 100 мА, а в стационарных условиях — 1,0–1,5 мА.

Зависимость фототока от светового потока у большинства фоторезисторов имеет нелинейный характер, поэтому фоторезисторы принято характеризовать удельной чувствительностью, выражаемой в мкА/(лм·В). Нелинейность фоторезисторов, влияние на показатели последней температуры, а также инерционность их ограничивают применение преобразователей этого типа.

Вентильные фотоэлементы представляют собой полупроводниковые диоды и триоды, в которых запирающий слой переходов под действием света становится источником тока. Цепь с таким фотоэлементом не нуждается в дополнительном питании, что составляет основное их достоинство.

Характеристика вентильных фотоэлементов нелинейна. Так же, как и фоторезисторы, они инерционны, что ограничивает возможность их использования, хотя они и обладают чувствительностью, в несколько раз большей чувствительности фоторезисторов. Величину тока, протекающего через фототриод, можно регулировать изменением освещенности или изменением тока управляющего электрода (чаще всего базы). Это позволяет, например, суммировать световые и электрические сигналы, постоянный ток преобразовывать в переменный и т. д.

Основные данные некоторых фотоэлементов приведены в табл. III.3.

§ III.3. Промежуточные звенья измерительных систем

В передающих или промежуточных звеньях электрических измерительных систем сигналы датчика усиливают, преобразуют и формируют с учетом особенностей выходного звена системы и предусматриваемого способа фиксирования (документирования) результатов наблюдений. Основными устройствами этого звена являются усилители, выбор которых предопределяет структурная схема, принятая для измерительной системы.

Так, в системах с обратной связью от усилителей требуется высокая чувствительность, тогда как амплитудные и частотные характеристики и строгое постоянство коэффициента усиления не имеют решающего значения. Наоборот, в системах прямого преобразования обязательна высокая стабильность характеристик усилителя и особенно коэффициента усиления, необходима также линейная амплитудная характеристика и широкая полоса пропускания.

В измерительных системах применяют усилители переменного тока, постоянного тока и на несущей частоте [61, 62].

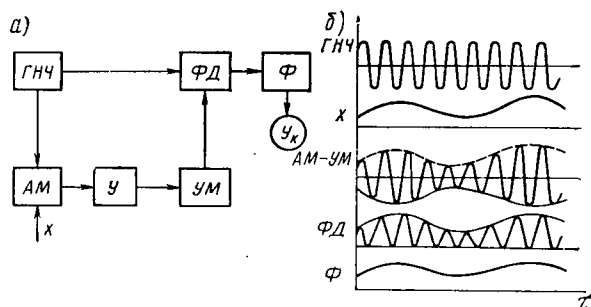


Рис. III.6. Блок-схема (а) и последовательность преобразования (б) сигналов в усилителе на несущей частоте

Усилители переменного тока отличаются простотой и стабильностью характеристик, но полоса их пропускания ограничена. Поэтому они пригодны больше для измерений при достаточно высокой частоте ниже гармоник исследуемого процесса (начиная от 20 Гц) и умеренной частоте высших гармоник (до 8–10 кГц). В частности, усилители переменного тока применяют для усиления сигналов недокомпенсации (см. рис. III.1). При необходимости в схему вводят преобразователи частоты входного сигнала.

Усилители постоянного тока отличаются сравнительно широкой полосой пропускания (до 200 кГц), но имеют недостаточно стабильные характеристики. На протекание характеристик заметное влияние оказывают колебания питающих напряжений, температуры, влажности, а также изменение со временем свойств деталей самого усилителя. Область применения усилителей этого типа — усиление широкополосных сигналов с постоянной составляющей, положим, от пьезоэлектрических датчиков давления.

Усилители на несущей частоте наиболее универсальны. В блок таких усилителей входят генератор несущей частоты $ГНЧ$ (0,5–50 кГц), амплитудный модулятор $АМ$ (в виде мостовой или дифференциальной схемы), усилитель $У$ переменного тока, модулятор усиленных сигналов $УМ$, фазочувствительный детектор $ФД$, осуществляющий демодуляцию усиленного сигнала и одновременно определяющий знак приращения параметра датчика и, наконец, фильтр несущей частоты $Ф$, после которого сигнал подается на выходное звено (указатель $У_k$). Общая

блок-схема усилителя и последовательность прохождения и преобразования им сигналов датчика показаны на рис. III.6.

Эффективность усилителей данного типа предопределяется правильным выбором несущей частоты. Необходимо, чтобы несущая круговая частота ω превышала наибольшее значение модулирующей круговой частоты Ω не менее, чем в $10\div 15$ раз.

Мгновенное значение выходного напряжения при симметричной модуляции с использованием, например, мостовой сбалансированной схемы

$$U_x = (1/2) \Delta U \sin(\omega + \Omega) \tau + (1/2) \Delta U \sin(\omega - \Omega) \tau,$$

где ΔU — амплитуда отклонений модулированного сигнала от первоначального значения; τ — время.

Так как Ω — частота наивысшей гармоники исследуемого процесса, то полоса пропускания усилителя должна, видимо, лежать в пределах от $\omega + \Omega$ до $\omega - \Omega$, где $\omega \gg \Omega$ [62].

Чтобы повысить компактность и экономичность усилительных и преобразовательных устройств, отдельные элементы их выполняют на транзисторах, но в силу чувствительности последних к изменению температуры предусматривают термостатирование системы.

В промежуточных звеньях измерительных систем в настоящее время широко используют преобразователи измеряемых аналоговых величин в цифровой код, который и преобразуется в сигналы, посылаемые на выходное устройство.

§ III.4. Выходные устройства информационных систем

Сигналы от объекта исследования, воспринятые и преобразованные датчиком, усиленные и сформированные в промежуточных звеньях, в последнем выходном звене системы проходят заключительную стадию преобразования в определенный вид информации с непрерывным или дискретным выражением. Для информационных систем обычно применяют автоматическую регистрацию результатов измерений, используя на выходе устройства прямого преобразования, следящие и развертывающие системы и цифровые системы дискретного действия [60].

Принцип прямого преобразования используют во многих универсальных регистрирующих приборах электрического действия, пригодных для информационных систем, как-то: самопишущие вольтметры, гальванометры и логометры, приборы магнитной записи, электрические и электронные осциллографы и др. Указанные исполнительные преобразователи позволяют записывать любую информацию за счет энергии самого выходного сигнала, поэтому усилители обратной связи имеют для них вспомогательное значение.

При необходимости применяют координатные регистраторы с двумя исполнительными преобразователями, используя для этого электроннолучевые трубки или измерительные гальванометры от электрических осциллографов.

Электрические осциллографы, называемые также светолучевыми или магнитоэлектрическими, вследствие универсальности и простоты устройства широко распространены в исследовательской практике. Основу их составляют измерительные гальванометры прямого преобразования токов или напряжений в пропорциональные угловые перемещения подвижных частей, обладающих небольшим моментом инерции. В прорези (щели) постоянного магнита 15 на легкой подвижной рамке или петле 16 из тонкой бронзовой ленты, обладающей небольшим моментом инерции, помещают миниатюрное зеркальце 14, отклонения которого от опорных призмочек 13 фиксируют фотографическим способом по следу отражаемого от него светового луча (рис. III.7). Магнитоэлектрические (светолучевые) осциллографы имеют до 8 и даже 48 гальванометров и позволяют поэтому одновременно регистрировать соответствующее количество параметров на рулонную фотобумагу или на фотокиноленту.

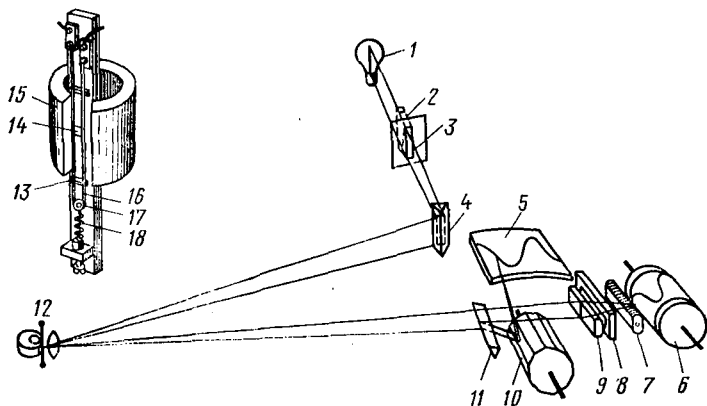


Рис. III.7. Принципиальная схема светолучевого осциллографа

Действие светолучевого осциллографа можно понять по схеме, показанной на рис. III.7. Луч света от источника 1 направляется через конденсатор 2, диафрагму 3 и призму 4 на зеркальце шлейфа 12. Отраженные зеркальцем лучи делятся на две части призмой 11, верхняя часть лучей проходит через цилиндрическую линзу 9, щелевую 8 и поворачивающуюся 7 диафрагмы и попадает на светочувствительный материал, протягиваемый барабаном 6. Нижняя часть лучей проходит к вращающемуся барабану 10 с зеркальными гранями и разворачивается им на экране 5, что позволяет визуально наблюдать за исследуемым процессом.

Магнитоэлектрические преобразователи осциллографов, т. е. измерительные гальванометры петлевого типа, обладают хорошими динамическими качествами (быстродействие $10 \div 12$ кГц), но имеют малую чувствительность; рамочного типа — чувствительны, но низкочастотны (быстродействие $2 \div 5$ кГц). Только в случаях применения жестких растяжек для рамок собственная частота колебаний рамок

повышается до 10 кГц и более. Из-за большого разброса динамических характеристик измерительных гальванометров (не исключая и однотипные) последние требуют предварительной экспериментальной проверки.

Электронные, или катодные, осциллографы практически безынерционны и очень удобны для визуального наблюдения исследуемых процессов в двигателях внутреннего сгорания. Роль подвижного элемента выполняет в них электронный луч. Основу катодных осциллографов составляет электроннолучевая трубка с

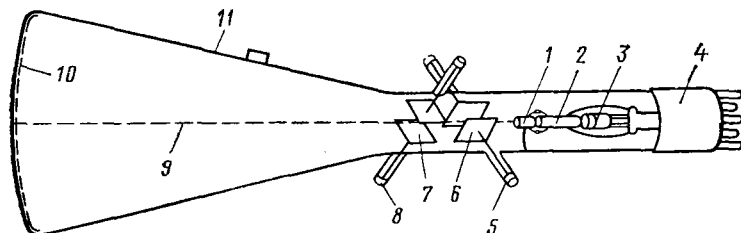


Рис. III. 8. Схема электроннолучевой трубки

цоколем 4, выполняемая из стекла и содержащая источник электронов, которым служит катод 3 (рис. III.8).

Поскольку электроны являются электрическими отрицательными зарядами, то на создаваемый ими поток можно воздействовать электрическими или магнитными полями. В технике автоматической регистрации обычно применяют трубки с электрическим управлением с помощью еще двух анодов 1 и 2. Первый из них фокусирует электронный луч, а второй создает дополнительное большое ускорение потоку для повышения яркости пятна на экране осциллографа. Электронный луч проходит между двумя парами пластинчатых электродов 6 и 7, называемых отклоняющими пластинами, которые, находясь под напряжением, создают электростатическое поле, отклоняющее луч в направлениях двух взаимно перпендикулярных осей 5 и 8. Величина отклонений луча зависит от напряжений, подаваемых на пластины. Луч 9 падает на поверхность экрана 10, который с внутренней стороны покрыт люминесцирующим составом (люминофором), а поверхности 11 покрыты полупроводящим составом (аквадагом), обеспечивающим стекание зарядов с экрана.

Под действием потока электронов на экране возникает свечение, которое затухает после снятия луча, оставляя на экране соответствующее изображение, что является первичной регистрацией изучаемого процесса. Вторичную регистрацию осуществляют фотографированием изображения с экрана осциллографа.

Существенными недостатками катодных осциллографов до последнего времени являлись ограниченность числа регистрируемых параметров (обычно один, два) и определенные трудности фотографирования изображений с экрана трубки. Но освоены уже шести-, восьмилучевые катодные осциллографы с большим экраном. Так, отечественная

Таблица III.4

Регистрирующие устройства	Предельная погрешность, в % от полной шкалы	Быстродействие, Гц	Число каналов	Стабильность
Электромеханические записывающие	2,5	1,0	1—2	Удовлетворительная
Магнитоэлектрические с падающей дужкой	1,5	0,1	1—12	Хорошая
Автоматические потенциометры, или мосты	0,25	2,0	1—24	Отличная
Осциллографы светолучевые	2,0	$8 \cdot 10^3$	1—48	Хорошая
Осциллографы катодные	5	10^3	1—8	Плохая
Цифровой вольтметр (электронный или транзисторный)	0,1	$5 \cdot 10^3$	1	Хорошая
Магнитные регистраторы с частотной модуляцией	2,0	$5 \cdot 10^3$	1—14	»
Магнитные регистраторы с амплитудной модуляцией	20	10^5	1—14	Плохая

промышленность выпускает, например, восьмилучевой осциллограф И-11 с размером экрана 180×220 и длительностью послесвечения 30 с.

Принцип следящей системы используют в автоматических потенциометрах, равновесных мостовых схемах (см. гл. VIII) и других регистрирующих устройствах, основанных на уравнивании входных электрических или неэлектрических сигналов вспомогательными компенсирующими сигналами. Такие устройства снабжают реверсивными электрическими двигателями, которые согласованно перемещают регистрирующие инструменты с большой точностью. Если в систему введены электронные усилители и корректирующие связи, то она обладает и большим быстродействием.

Так как в следящих системах сочетаются компенсационные методы измерения, обеспечивающие высокую точность, с реверсивными двигателями мощностью, достаточной не только для регистрации измеряемых величин, но также для автоматического регулирования различных процессов, то в практике им отдают предпочтение. Известны устройства со следящими системами, обеспечивающие запись в прямоугольных или полярных координатах, многочисленные быстродействующие системы для поочередной записи до 100 измеряемых величин [60]. Более удобны записи в прямоугольных координатах, например, в автоматических потенциометрах ЭПП-09, которые легко приспособить для записи большого числа величин во времени или в функции какого-либо другого фактора.

Развертывающие системы удачно сочетают компенсационный метод измерений с импульсным отображением результатов. При использовании в таких устройствах средств электроники они приобретают сравнительно большое быстродействие и позволяют переходить к регистрации результатов в цифровой форме. Так, применение электронных генераторов увеличивает скорость развертывающего преобразования до 10 кГц.

Цифровые системы дискретного действия отличаются от описанных наличием кодирующих и декодирующих устройств, основанных на механических, электромагнитных и электронных элементах. Такие системы действуют по релейному принципу методами механического печатания, перфорации, фотографии и т. д. с использованием цифрочатающих телеграфных аппаратов (телетайпов), электрических пишущих машинок, автоматических перфораторов и т. д. [60].

Технические характеристики некоторых регистрирующих устройств приведены в табл. III.4.

§ III.5. Согласование характеристик звеньев измерительных систем

Современные методы проведения различных типовых и исследовательских испытаний автомобильных и тракторных двигателей связаны с применением соответствующих эффективных и надежных измерительных систем с хорошо согласованными характеристиками отдельных звеньев. Руководствуясь общими требованиями, предъявляемыми при этом к измерительным средствам (см. гл. II), в первую очередь комплектуют входные и выходные звенья системы, т. е. подбирают наиболее подходящие датчики и указатели из числа существующих стандартных устройств, обладающих желаемой точностью и быстродействием. Узко специализированные устройства разрабатывают только в крайних случаях, так как это трудоемко и не всегда оправдывает себя.

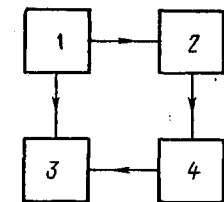


Рис. III.9. Блок-схема установки для проверки согласованности характеристик звеньев измерительных систем

Вполне очевидно, что первичные и выходные звенья полностью определяют выбор аппаратуры для промежуточного звена системы, состоящего из передающих, преобразующих и усиливающих устройств, которые должны иметь соответствующие амплитудные и частотные характеристики. Согласование амплитудных характеристик, как правило, не вызывает затруднений, поскольку существующая измерительная аппаратура обычно имеет широкий диапазон регулировок чувствительности. Согласование частотных характеристик более сложно и требует иногда экспериментального уточнения.

Степень согласования частотных характеристик звеньев системы можно проверить с помощью установки, блок-схема которой показана на рис. III.9. Основу ее составляют генераторы 1 и 2 образцовой частоты, сигналы от которых поступают на измерительную систему 4 и одновременно фиксируются осциллографом 3. Сопоставление осциллограмм позволяет оценивать фазовые погрешности регистрации и вводить нужную корректировку характеристик аппаратуры.

ГЛАВА IV ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ

§ IV.1. Общие сведения

Большинство величин, измеряемых в процессе испытаний, в конечном итоге связано с определением эффективной мощности двигателя и изысканием возможностей ее повышения.

Эффективную мощность N_e (кгс·м/с), т. е. мощность, отбираемую от вала двигателя и поглощаемую тем или иным внешним сопротивлением (тормозом), определяют путем измерения крутящего мо-

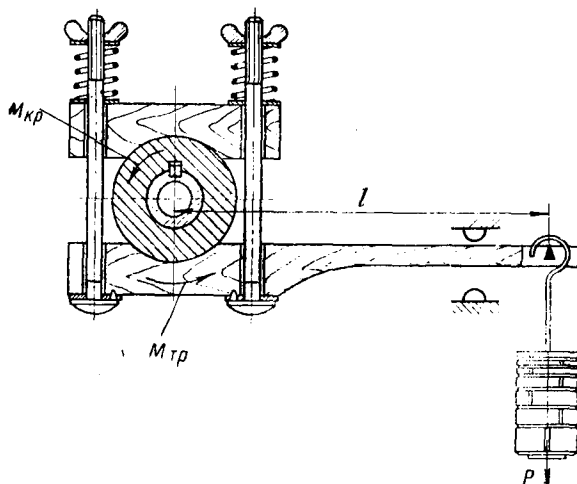


Рис. IV.1. Принципиальная схема простейшего тормоза

мента $M_{кр}$, развиваемого двигателем при данном числе n оборотов его вала,

$$N_e = M_{кр} \omega = M_{кр} (\pi n / 30),$$

где ω — угловая скорость вращения вала двигателя, рад/с.

Мощность автомобильных и тракторных двигателей измеряют обычно в лошадиных силах (л. с.):

$$N_e = M_{кр} (\pi n / 30) (1/75) = M_{кр} n / 716,2.$$

Тормозное устройство выполняют таким образом, чтобы можно было определить крутящий момент, развиваемый двигателем. Так, момент трения $M_{\text{тр}}$, действующий на ротор (барабан) механического тормоза и равный крутящему моменту $M_{\text{кр}}$ (кГс·м) двигателя, уравновешивают грузом P , подвешивая его на определенном плече l (рис. IV. 1):

$$M_{\text{кр}} = M_{\text{тр}} = Pl,$$

тогда мощность (л. с.)

$$N_e = M_{\text{кр}} n / 716,2 = Pl n / 716,2 = (l / 716,2) P n = k P n.$$

Коэффициент k называют *постоянной тормоза*. Величину его обязательно указывают в паспорте тормоза. Вместо k приводят иногда значение $1/k$, тогда

$$N_e = P n / k.$$

Чтобы облегчить процессы измерения и определения мощности двигателя, длину плеча l тормоза выбирают кратной величине 716,2, чаще всего принимают 0,7162 или 0,3581 м. Можно принимать любые другие значения, но такие, чтобы постоянная тормоза выражалась простым числом и не затрудняла обработку результатов испытаний. Так, для указанных значений l соответственно:

$$k = 0,7162 / 716,2 = 0,001; \quad 1/k = 1000;$$

$$k = 0,3581 / 716,2 = 0,0005; \quad 1/k = 2000.$$

По Международной системе единиц СИ мощность измеряют в кВт. Поскольку 1 кВт = 1,36 л. с., то формула для подсчета мощности (кВт) принимает вид:

$$N_e = (M_{\text{кр}} n / 716,2) (1 / 1,36) = M_{\text{кр}} n / 974.$$

Тормозные устройства, поглощающие механическую энергию, развиваемую двигателем, преобразуют ее непосредственно в тепловую или в любой другой, легко измеряемый вид энергии, например, в электрическую, которая в известных условиях может быть применена с пользой, либо тоже превращена в тепло и рассеяна.

Одновременно с поглощением мощности двигателя конструкции тормозов чаще всего позволяют приводить в действие и устройства для измерения развиваемого ими крутящего момента. С этой целью корпус тормоза балансируют и закрепляют на стойках и соответствующим образом соединяют его с измерительной аппаратурой. Тормозное и измерительное устройства образуют при этом единую установку, называемую *тормозным динамометром*. Если корпус тормоза не имеет балансирующей подвески, то работу измерительной аппаратуры основывают на измерении угла закручивания соединительного вала тормоза с двигателем под действием передаваемого валом крутящего момента. В качестве тормоза может служить при этом непосредственно машина-потребитель, а не только специальные тормозные устройства. Преимущества таких испытательных установок заключаются в возможности измерять как средние, так и мгновенные значения крутящего момента.

Наиболее известны механические, гидравлические, электрические, индукторные и воздушные тормоза. Тормоза с балансирно закрепляемым корпусом часто называют *балансирными машинами* или *тормозными динамометрами*, или же *динамометрами*, что не совсем правильно. При использовании воздушных тормозов иногда балансирно закрепляют сам двигатель на специальных станках, как в свое время широко практиковали в авиации [4]. С целью повышения мощности или расширения возможностей регулирования применяют и комбинированные тормозные установки, составленные из двух тормозов различных типов.

Независимо от устройства и принципа действия желательно, чтобы тормозные установки обеспечивали:

- 1) торможение двигателя в широком диапазоне относительной его загрузки на всех расчетных скоростных режимах работы;

- 2) стабильное торможение, поддерживая достаточно долго неизменным тормозной момент;

- 3) устойчивое торможение, сохраняя заданный скоростной режим в случае небольших кратковременных изменений нагрузки;

- 4) достаточно точное измерение крутящего момента или окружного усилия;

- 5) прокручивание вала двигателя или возможность его прокручивания от постороннего источника энергии, что необходимо для выполнения многих вспомогательных и подготовительных операций в процессе проведения типовых и научно-исследовательских испытаний;

- 6) полезное использование энергии, получаемой от двигателя в процессе торможения;

- 7) дистанционное управление органами, регулирующими нагружение двигателя;

- 8) сравнительно низкий уровень шума.

Для испытаний автомобильных и тракторных двигателей обычно применяют гидравлические и электрические тормозные установки, а в прошлом применяли и простейшие механические (см. рис. IV.1).

При всем многообразии тормозов основу их конструкции составляют ротор, вращающийся вместе с валом двигателя, и статор, совершающий угловое перемещение около оси ротора при балансирной подвеске его.

Главными определяющими параметрами тормозов служат тормозная мощность N_e [л. с. (кВт)], тормозной момент M (кгс·м) и допустимая скорость n (об/мин) вращения ротора.

Неотъемлемой частью тормозных устройств, как отмечалось, являются приборы, измеряющие окружное усилие или крутящий момент, развиваемые двигателем. Эти приборы с системой их специфичных передающих и преобразующих звеньев и составляют собственно динамометры, т. е. силоизмерители. На практике применяют динамометры различных типов, причем в зависимости от назначения тормоза его снабжают тем или иным подходящим для этого динамометром, имея в виду нужную точность измерения крутящего момента двигателя.

§ IV.2. Измерение крутящего момента двигателя

Момент на валу работающего двигателя определяют либо путем измерения равного ему момента реакции статора тормоза, либо путем измерения угла закручивания соединительного вала под действием передаваемого момента. В любом случае испытатели сталкиваются с определенными трудностями в получении достоверных результатов измерений в связи с тем, что динамометры тормозных установок действуют в условиях повышенной вибрации и резко изменяющихся нагрузок, граничащих иногда с ударными, особенно на неустановившихся режимах работы двигателя внутреннего сгорания.

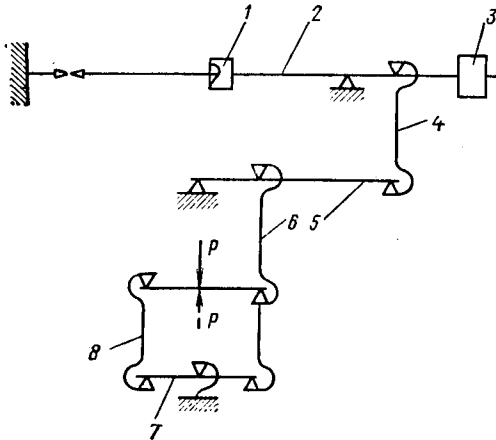


Рис. IV.2. Схема динамометра с рычажными весами

установок действуют в условиях повышенной вибрации и резко изменяющихся нагрузок, граничащих иногда с ударными, особенно на неустановившихся режимах работы двигателя внутреннего сгорания.

Для определения величины крутящего момента, развиваемого испытуемым двигателем, используют различные механические, гидравлические и электрические динамометры. Структурная схема их, так же как и других измерительных устройств,

состоит из первичного, промежуточного и выходного звеньев. По самому характерному из звеньев и классифицируют разновидности динамометров. Часто только это характерное звено и считают динамометром, что не является правильным.

Механические динамометры находят самое широкое применение. Выполняют их в виде рычажных систем с маятниковыми, реже с пружинными весами. Ранее для этих целей в основном служили многорычажные весы десятичного типа [55]. И теперь они находят еще применение при испытании мощных тихоходных стационарных двигателей [11].

Динамометр с рычажными весами схематично показан на рис. IV.2. Поскольку такие весы не реверсивны, то в промежуточном звене динамометра предусматривают специальное реверсное устройство, работающее следующим образом. Когда сила P , приложенная к рычагу тормоза, направлена вверх, то, действуя на тягу 8, через рычаг 7 она передается на тягу 6, перемещая ее вниз, а через рычаг 5 и тягу 4 нагружает коромысло 2 весов. При направлении вниз сила P , минуя реверсное устройство, непосредственно действует на тягу 6 в том же направлении, нагружая, следовательно, коромысло весов независимо от направления враще-

ния ротора тормоза. Груз $З$ обеспечивает уравнивание коромысла весов при положении гири 1 на нулевом делении ее шкалы, а уравнивание силы P и определение ее величины достигают путем перемещения гири 1 по коромыслу. В современных весовых устройствах этого типа гирю-рейтер 1 перемещают с помощью специального следящего механизма, позволяющего автоматически уравнивать нагрузку и вести дистанционное наблюдение за показаниями весов.

Чтобы уменьшить потери на трение, рычажную систему выполняют на призмах, чувствительных к толчкам и подверженных износу. Поэтому в нерабочем состоянии и особенно при пуске двигателя рекомендуется блокировать рычажную систему специально предусмотренным для этого устройством.

Точность и чувствительность рычажных весов значительно превосходят требуемые от механизмов для определения усилия на рычаге тормоза. Однако надежность и маневренность их невелики даже с наличием автоматической следящей системы. Поэтому в лабораториях автомобильных и тракторных двигателей исключительное предпочтение отдают менее точным и не столь чувствительным, но более прочным, быстродействующим и стабильным в отношении показаний маятниковым весам и основанным на них динамометрам.

Маятниковые динамометры отличаются компактностью, наглядностью, простотой в эксплуатации и позволяют автоматически, не перемещая гирю-груз, уравнивать действующую силу P . Схема основного звена простейшего динамометра этого типа показана на рис. IV.3.

Маятниковые весы не искажают показаний под влиянием остаточных деформаций, как, например, пружинные, и, будучи реверсивными позволяют измерять нагрузку при любом направлении вращения ротора тормоза. Обладая свойствами поглощать незначительные колебания, маятник не затрудняет отсчета при случайных колебаниях нагрузки, что присуще рычажным весам. Но так же, как и для других аналогичных приборов, для них важно уменьшение трения в сочленениях и уравнивание собственного веса тяг маятника.

Принцип действия маятникового весового устройства следующий. На рычаге длиной l подвешен груз Q , который вместе с сектором радиуса r может поворачиваться около оси O . К сектору, выполненному в форме квадранта, т. е. сектора с углом 90° , посредством ленточной тяги прикладывается измеряемая сила P . Очевидно,

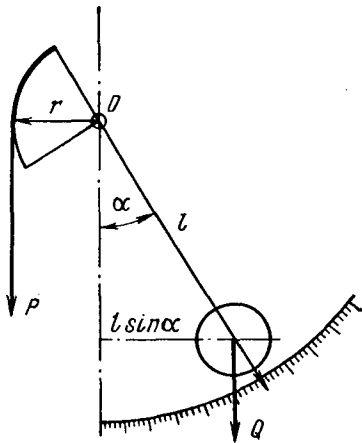


Рис. IV. 3. Принцип действия маятникового динамометра

система придет в равновесие, когда момент от силы P будет равен моменту от силы Q относительно точки O подвеса:

$$Pr = Ql \sin \alpha$$

или

$$P = Ql \sin \alpha / r = C \sin \alpha,$$

где C — величина, зависящая от конструкции механизма.

Однако в таком простейшем исполнении маятниковый механизм не совсем удобен, так как имеет неравномерную шкалу отсчета. Поэтому для выравнивания отсчетной шкалы сектор-квадрант профилируют по закону $r = a \sin \alpha / \alpha$, принимая a за исходную величину. Тогда угол отклонения маятника всегда будет пропорционален прилагаемому усилию:

$$P = (Ql/a) \alpha = C\alpha.$$

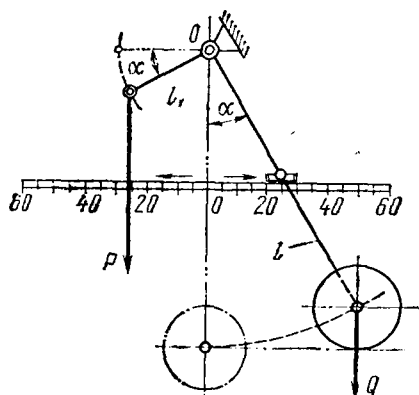


Рис. IV.4. Маятниковые весы с равномерной шкалой отсчета

Другой способ выравнивания шкалы маятниковых весов состоит в применении схемы, показанной на рис. IV.4. Сила P прикладывается к концу рычага l_1 , поэтому при отклонении маятника на угол α условие равновесия такой системы относительно точки O определяется соотношением:

$$Pl_1 \cos \alpha = Ql \sin \alpha,$$

откуда

$$P = Q(l/l_1) \operatorname{tg} \alpha.$$

Следовательно, усилие P от рычага тормоза вызывает отклонение маятника от вертикали на величину, пропорциональную тангенсу угла α . Если в этом случае расположить шкалу горизонтально, а отсчет вести с помощью ползунка, скользящего по шкале под действием рычага маятника, несущего гирию-груз Q , то отсчетная шкала будет равномерной.

Чтобы уменьшить трение, подвеску маятника выполняют на шарикоподшипнике. Тем не менее относительные потери на трение остаются значительными. Это обстоятельство и наличие зазоров в сочленениях ползунка с маятником снижают точность маятниковых динамометров до $\pm 1\%$. Поэтому применение их ограничивают областью типовых испытаний.

Динамометры с весовой головкой в сравнении с обычными маятниковыми обладают большей точностью измерения (погрешности не превышают $0,1 \div 0,2\%$) и достаточно чувствительны, что позволяет применять их при выполнении научно-исследовательских работ.

Основу таких динамометров составляет весовая головка, чаще всего двухмаятниковая, в сочетании с рычажными весами. Однако

двухмаятниковые головки не реверсивны, поэтому в промежуточное звено динамометра вводят такое же реверсное устройство, как в обычные динамометры с рычажными весами (см. рис. IV.2). В сущности динамометры с весовой головкой представляют собой механизмы с рычажными весами, к коромыслу *1* которых подсоединена циферблатная весовая головка. Головка воспринимает только часть измеряемой силы, не уравновешиваемую передвижной гирей *2*, и благодаря этому позволяет наблюдать за изменением нагрузки в пределах ее циферблата. Гирю *2* используют иногда для расширения диапазона измерений, как, например, в весовых устройствах типа ВКМ (рис. IV.5).

Двухмаятниковая весовая головка показана на рис. IV.6. Трение скольжения заменено в ней трением качения. Маятники снабжены секторами-квадрантами *2* с радиусом r_1 и подвешены на тонких стальных лентах к направляющим *3*, прикрепленным к остову весов. Усилие P через тягу *9*, балансир *10* и две стальные ленты *7* передается большим секторам-квадрантам *4*, имеющим радиус r_2 . Профилированные секторы *4* жестко укреплены совместно с секторами *2* на верхних концах рычагов-маятников *1*, имеющих длину l . Оси секторов связаны между собой соединительной планкой *5*, к которой прикреплена рейка *6*, находящаяся в зацеплении с шестерней *11*, посаженной жестко на ось стрелки указателя. Когда сила P не приложена, маятники занимают положение, показанное на схеме штрих-пунктирной линией, и центр тяжести их находится на одной вертикали с точкой подвеса лент малых секторов *2* к направляющим *3*. Под действием силы P балансир *10* опускается вместе с большими секторами, а маятники перемещаются, перекатываясь на секторах *2* по направляющим *3*, совершая при этом сложное движение, одновременно отклоняясь на некоторый угол и поднимаясь вверх от своего первоначального положения *8*, увлекая с собой планку *5*. Перемещение планки и связанной с ней рейки *6* приводит во вращение шестерню *11* и, следовательно, стрелку указателя, которая отсчитывает величину силы P на его шкале.

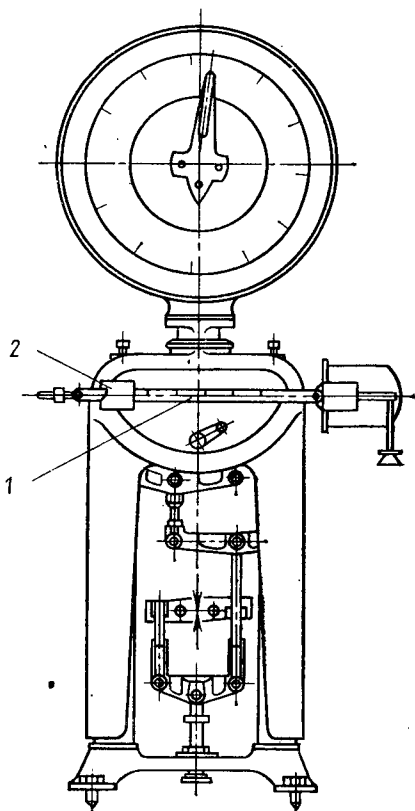


Рис. IV. 5. Весовое устройство ВКМ с двухмаятниковой головкой

Отклонение маятника весом q на угол α от вертикали создаст момент

$$M_1 = q(l \sin \alpha + r_1),$$

а сила P развивает момент

$$M_2 = P(r_2 - r_1).$$

Поскольку система находится в равновесии, то

$$2M_1 = M_2,$$

или

$$2q(l \sin \alpha + r_1) = P(r_2 - r_1),$$

откуда

$$P = 2q(l \sin \alpha + r_1)/(r_2 - r_1),$$

а это свидетельствует, что перемещение балансира 10 является функцией величины силы P . Так как маятники совершают колеба-

ния в разные стороны от вертикали, а секторы-квадранты 4 спрофилированы с учетом приводившейся выше закономерности, то круговая отсчетная шкала головки получается совершенно равномерной для всего диапазона перемещения маятников.

Весовые головки с циферблатным отсчетным устройством удобны и весьма надежны в эксплуатации, хотя требуют тщательной защиты их сочленений и шарниров от влаги и пыли и еще более тщательного устранения в них люфтов.

Чтобы обеспечить необходимую точность измерений, весовые устройства выбирают,

Рис. IV. 6. Принципиальная схема двух-маятниковой весовой головки

сообразуясь с мощностью испытуемого объекта. Так, весовые устройства типа ВКМ снабжают циферблатными головками, позволяющими измерять усилия до 10, 25, 40, 80 и 120 кгс и более, а использование передвигной гири 2 расширяет пределы измерения ими до 20, 40, 50, 100 и 170 кгс [11]. Выбор нужной единицы измерения в кгс или кгс·м зависит от того, какая из них была положена в основу градуировки шкалы весового устройства тормоза. Цена деления шкалы весовой головки может выражать как доли произведения Pl , так и P . Иногда на циферблат наносят одновременно обе шкалы.

Конструкция весовых головок, как правило, допускает поворачивание их около вертикальной оси в любое положение. Это позволяет наблюдать за показаниями под наиболее выгодным углом

зрения независимо от места нахождения испытателя. Сравнительно большие размеры циферблата и отсчетных делений не затрудняют наблюдений даже на некотором расстоянии. При необходимости применяют подсветку циферблата лампочками, используют бинокли, а также специальные оптические устройства с аналогово-цифровыми преобразователями, с помощью которых обеспечивается надежная дистанционная передача или считывание показаний.

Гидравлические динамометры, или **месдозы**, как именуют их часто по названию основного измерительного звена, отличаются подкупающей простотой.

Наиболее распространены непроточные месдозы (рис. IV.7). Основу их составляет корпус 5, заполненный жидкостью и закрытый упругой диафрагмой 4, уплотняемой с помощью прижимного кольца 2. На диафрагму давит поршень 3 под действием измеряемой силы P , а возникающее давление фиксируется манометром 6.

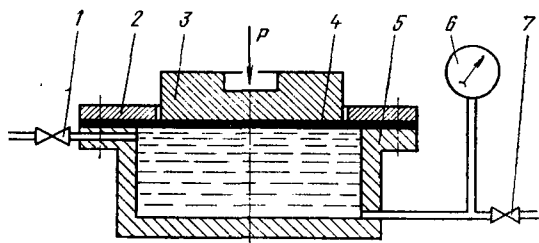


Рис. IV.7. Схема простейшего гидравлического динамометра

При измерении давлений до 10 кгс/см^2 диафрагму месдозы изготовляют из высокопрочной прорезиненной ткани толщиной $0,3 \div 0,8 \text{ мм}$ или из бериллиевой бронзы толщиной $0,05 \div 0,06 \text{ мм}$, имеющей линейную характеристику и неотягощенной гистерезисными явлениями. Для измерения более высоких давлений применяют маслобензостойкую резину толщиной $2-3 \text{ мм}$ или тонколистовую сталь. В качестве рабочей жидкости используют различные масла, технический глицерин и другие жидкости.

Непроточные месдозы кроме простоты отличаются широким диапазоном измерения, включая очень высокие давления. Однако на показания месдоз существенное влияние оказывает температура окружающей среды вследствие того, что объемный коэффициент расширения жидкостей больше, чем у металлов. При изменении внешних условий из жидкости может к тому же освобождаться воздух, который растворяется в ней в количестве примерно до 10% при нормальных условиях, а с увеличением давления растворимость его возрастает по линейной зависимости. Поэтому перед каждым испытанием месдозу необходимо тарировать и возможно чаще проливать, используя для этого краны 1 и 7.

Указанные недостатки непроточных месдоз удается устранить путем использования более сложных гидравлических устройств, так называемых *проточных* и *компенсационных диафрагменных месдоз*.

Электрические динамометры в общем случае представляют собой приборы, в которых деформация упругого элемента вызывает изменение определенного электрического параметра, положенного в основу измерения крутящего момента или крутящего усилия.

Для этих целей пригодны многие из рассмотренных выше электрических методов измерений неэлектрических величин, функционально связывающих измеряемые величины с посылаемыми в измерительную цепь. Но в практике испытания двигателей чаще других используют измерительные преобразователи, основанные на изменении омического сопротивления, емкости, индуктивности, индукционной и фотоэффекта под действием входной неэлектрической величины. Входной механической величиной служат при этом скручивание соединительного вала тормозной установки, угловое перемещение деталей измерительных муфт или же деформация упругого элемента, так называемого динамометрического звена, на которое действует рычаг тормоза. Чаще других используют способ, связанный с измерением угла закручивания соединительного вала. Динамометры этого типа называют также *торсионными*.

Торсионные динамометры базируются на известной закономерности между углом закручивания вала, т. е. углом относительного поворота двух его сечений, взятых на расстоянии l одно от другого, и действующим крутящим моментом $M_{кр}$ (кгс·м):

$$\varphi = [l/(GJ_p)] M_{кр},$$

где G — модуль сдвига материала вала, кгс/см²; J_p — полярный момент инерции сечения вала, см⁴.

Для вала круглого сечения диаметром d эта зависимость приобретает вид

$$\varphi = [32l/(\pi d^4 G)] M_{кр} \approx [10l/(d^4 G)] M_{кр},$$

откуда следует, что угол закручивания вала в пределах упругих деформаций пропорционален прилагаемому к валу крутящему моменту.

Так как величина касательного напряжения τ в наружных слоях вала предопределяется крутящим моментом $M_{кр}$ и связана с ним зависимостью

$$\tau = 16M_{кр}/(\pi d^3),$$

то максимально допускаемый угол закручивания вала

$$\varphi_{max} = (2\tau_{доп}/G) (l/d).$$

Для специальных измерительных валов применяют стали, допускающие высокие касательные напряжения, что позволяет увеличивать угол закручивания этих валов до 4—5° на длине $10d$.

В зависимости от способа измерения угла закручивания вала различают торсионные динамометры, механические, оптикомеханические и электрические. Наиболее широкое применение для этих целей находят электрические измерения с помощью различных тензодатчиков.

Особенности применения тензодатчиков для измерения крутящего момента с помощью торсионных динамометров обуславливаются тем, что деформации на поверхности скручиваемого вала направлены под углом 45° к его оси. Поэтому на соединительный вал

следует наклеивать как минимум два тензосопротивления, ориентированные соответствующим образом относительно вала и друг друга.

Деформацию кручения вала можно измерить и с помощью одного лишь тензодатчика. Но такая простейшая схема отличается малой чувствительностью, восприимчива к деформациям вала в осевом направлении (изгиб, сжатие, растяжение), затрудняет компенсацию температурных влияний и подвержена значительному влиянию переходного сопротивления в скользящих контактах токосъемника. По сравнению с этим два датчика, наклеенные на одной стороне вала под углом 45° по отношению к его образующим и под прямым углом друг к другу, удваивают чувствительность, компенсируют действия побочных деформаций и температурных колебаний, но не устраняют вредного влияния скользящих контактов токосъемника.

Поэтому на соединительный вал тормозной установки наклеивают обычно сразу четыре тензодатчика, как показано на рис. IV.8, а [10]. Будучи к тому же наклеены попарно (1—4 и 2—3), но с двух сторон вала, они образуют измерительный мост, показанный на рис. IV.8, б, который через скользящие токосъемные устройства а—д соединен с усилителем измерительного прибора. При такой схеме резко повышается общая чувствительность преобразователя и практически устраняется влияние колебаний сопротивления в скользящих контактах. Токосъемники б, д служат для питания током измерительного моста, через токосъемники в, г в цепь моста включают балансировочное сопротивление R , которое необходимо для установки моста в нулевое положение перед началом измерений. Сопротивление R выполняют в виде потенциометра, движок которого подсоединен к сетке входной лампы усилителя.

Измерительный мост питают или постоянным, или переменным током, но стабилизированным по напряжению. Иначе нельзя гарантировать правильность действия измерительного прибора. Практикуется также питание измерительного моста от генератора постоянного или переменного тока, приводимого непосредственно от тензометрического вала, что позволяет изменять напряжение в измерительной цепи прямо пропорционально числу оборотов. Тогда

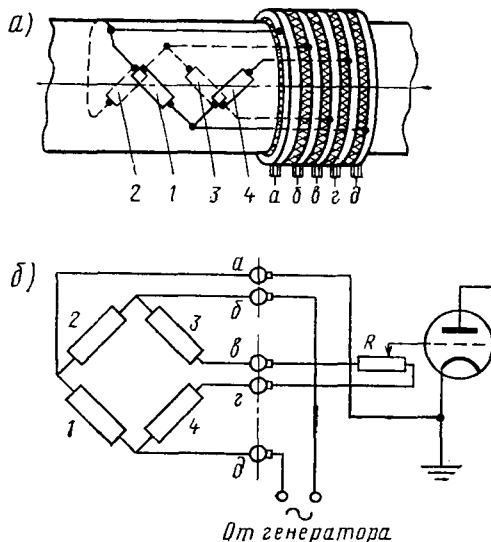


Рис. IV.8. Схемы наклейки проволочных датчиков на вал (а) и включения их в измерительную цепь (б)

ординаты осциллограммы оказываются пропорциональными произведению крутящего момента на угловую скорость вращения вала, следовательно, пропорциональными мощности, передаваемой через вал.

Точность рассматриваемых измерений во многом зависит от надежной работы токосъемного устройства, скользящие контакты которого вызывают опасные колебания величины переходного сопротивления. Эти помехи сводятся к минимуму, если все четыре

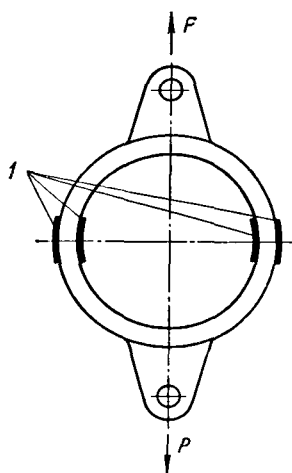


Рис. IV.9. Динамометрическое звено с наклеенными на него фольговыми тензосопротивлениями

датчика расположены на валу по схеме, приведенной на рис. IV.8. Тем не менее токосъемные устройства требуют тщательной обработки и внимательного ухода.

Контактные кольца рекомендуется изготавливать из материала с высокой теплопроводностью, например из серебра или латуни, а щетки применять графитовые или серебряно-графитовые с малой массой и достаточно высокой собственной частотой колебаний.

Более надежны в работе ртутные контактные устройства, но они сложнее обычных механических, а главное, не безопасны, поскольку приходится иметь дело с ртутью.

Опыт показывает, что наличие скользящих контактов в измерительной цепи прибора служит источником случайных погрешностей в измерениях. Поэтому к размещению тензосопротивлений на соединительном валу тормозной установки следует прибегать лишь при исследовании неустановившихся режимов работы двигателя. При измерении средних значений крутящего момента целесообразнее использовать деформацию так называемого динамометрического звена, широко применяемого для измерения сосредоточенных сил.

Динамометрическое звено представляет собой упругое кольцо с двумя диаметрально расположенными проушинами, с помощью которых оно соединяется с рычагом тормоза, т. е. с его статором. На наружной и внутренней сторонах кольца наклеивают по два тензосопротивления 1 из фольги (рис. IV.9). Получаемые в результате этого тензопреобразователи соединяют в измерительный мост [14].

При деформации упругого звена вследствие приложения силы к его проушинам одна пара тензосопротивлений в этом случае сжимается, а вторая — растягивается. Соответственно, сопротивление первой пары снижается, а второй — увеличивается, что вызывает последующий разбаланс измерительного моста, фиксируемый указателем измерительного прибора. В практике регистрируют или абсолютное усилие, или отклонение его от среднего, максимального или другого базового значения. Предпочтительнее второй способ,

поскольку он основан на сравнении двух физических величин, что существенно повышает точность измерений.

Погрешности измерений при использовании тензодатчиков без предварительной их тарировки составляют примерно $5 \div 10\%$ и уменьшаются до $1 \div 2\%$ в случаях прямого тарирования путем приложения к динамометрическому валу или упругому кольцу, а равно к любой другой испытываемой детали известного крутящего момента или нормированного усилия.

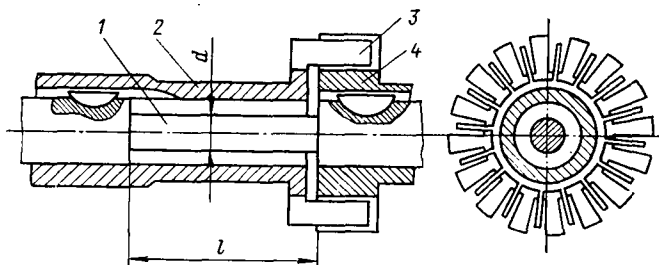


Рис. IV.10. Схема емкостного датчика измерения крутящего момента

Емкостный дифференциальный датчик для измерения крутящего момента двигателя показан на рис. IV.10. Конструкция его состоит из динамометрического участка 1 соединительного вала, проточенного до диаметра d на длине l , втулки 2, несущей подвижные пластины 3 конденсатора, и диска 4, зубья которого служат неподвижными пластинами конденсатора. Благодаря скручиванию вала зазоры между пластинами 3 и зубьями диска 4 изменяются, вызывая соответствующие изменения емкости: на стороне сближения пластин она увеличивается, а на противоположной уменьшается [1].

Известны более сложные дифференциальные емкостные датчики бесконтактного типа [27]. Однако в приборах измерения крутящего момента в качестве бесконтактных датчиков обычно применяют индукционные, индуктивные или фотоэлектрические датчики. Динамометры, оснащенные такими датчиками, не имеют скользящих контактов в измерительной цепи. В этом большое их преимущество, но они не лишены других свойственных им недостатков.

Индукционные датчики приборов измерения крутящего момента основаны на использовании свойств либо синхронных однофазных генераторов, либо постоянных магнитов.

При использовании синхронных однофазных генераторов роторы их закрепляют на упругой динамометрической вставке соединительного вала на некотором расстоянии друг от друга. Статоры генераторов включают встречно, поэтому при $M_{кр}=0$ индуцируемые в них величины э. д. с. равны и противоположны по фазе. При $M_{кр} \neq 0$ роторы датчиков смещаются относительно друг друга, а результирующая э. д. с. служит мерой скручивания упругого участка вала торсионного динамометра.

Более простыми и надежными в работе являются электрические динамометры данного типа с бесконтактными датчиками, основой которых служит постоянный магнит. Устройство и принцип действия такого динамометра можно понять по схеме, изображенной на рис. IV.11 [27] (сопротивления на схеме в кОм).

На упругой торсионной вставке 4, вмонтированной с помощью жестких муфт 1 и 5 в соединительный вал между тормозом и двигателем, закреплены и точно сориентированы относительно друг друга два совершенно одинаковых зубчатых диска 2 из магнитомягкого материала. Расстояние l_0 между этими подвижными элементами задающего устройства датчика является его базой. Против каждого вращающегося зубчатого диска неподвижно установлены и соответствующим образом сориентированы индукционные элементы Д-I и Д-II, состоящие из постоянного магнита 3 цилиндрической формы ($l=30$ мм, $d=8$ мм) с надетым на них каркасом 6 из стеклотекстолита, на который проводом ПЭ-0,1 наматывают около 1000 витков. Магниты 3 устанавливают так, чтобы зазор между их полюсами и торцами зубцов дисков 2 не превышал $0,5 \div 1,0$ мм.

При прохождении зубцов мимо полюсов магнитов в обмотках индукционных элементов Д-I и Д-II возникают короткие импульсы напряжения с частотой следования

$$f = nm/60,$$

где n — число оборотов вала в минуту; m — число зубцов на диске 2.

Поэтому в результате скручивания вала получают две последовательности импульсов, имеющих одинаковую частоту f , но сдвинутых относительно друг друга на время $\tau = k\Delta\phi$, пропорциональное углу закручивания $\Delta\phi$ вала и постоянному коэффициенту k , как показано на схемах I и II рисунка.

Вполне очевидно, что чем больше величина m , тем чувствительнее прибор, поскольку данному углу закручивания упругой вставки соединительного вала соответствуют большие значения относительных временных расстояний между импульсами, посылаемыми каждым из преобразователей. С этой же целью выбирают возможно большей величину l_0 (базу).

Импульсы, снимаемые с индукционных элементов Д-I и Д-II, поступают на входы электронной схемы, формирующей постоянное напряжение, пропорциональное измеряемому крутящему моменту. Прямоугольные импульсы, фиксируемые осциллографом Ос и условно показанные на схемах а и б рисунка, формируются узлами 7—11 и через фазоинвертор, собранный на левом триоде лампы 6Н8, управляют катодным повторителем, работающим в ключевом режиме. Среднее значение напряжения на конденсаторе емкостью 0,1Ф, служащее мерой измеряемого крутящего момента, регистрируется стрелочным указателем Г прибора. Для установки нуля служит реостат УН.

Тарировку динамометра с индукционным датчиком целесообразнее всего проводить в рабочих условиях путем сопоставления его

с механическим динамометром балансирной тормозной установки, которым измеряют при этом крутящий момент, развиваемый двигателем. По данным, получаемым таким образом, градуируют уже шкалу указателя тарированного динамометра.

И н д у к т и в н ы й д а т ч и к для измерения крутящего момента двигателя показан на рис. IV.12, а. Его ступенчатый упругий

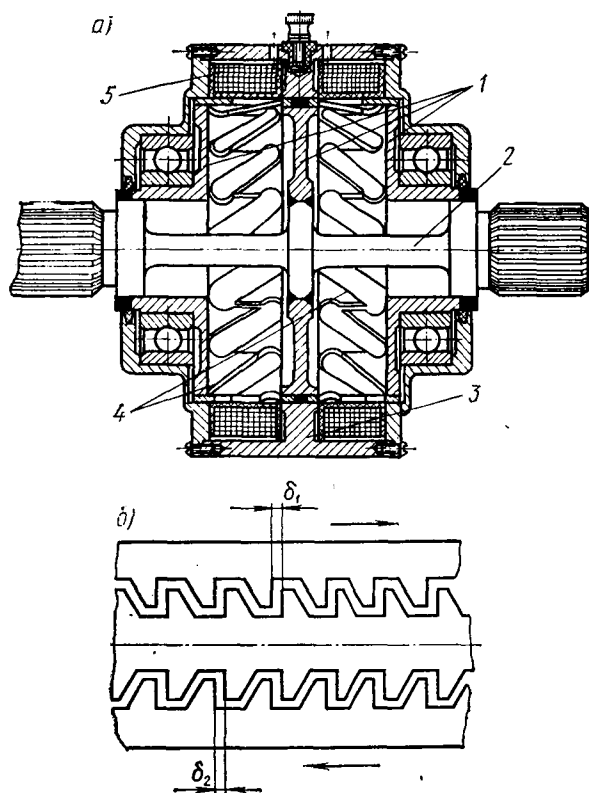


Рис. IV.12. Индуктивный датчик (а) для измерения крутящего момента и его ротор (б) после фрезеровки в нем зубцов

вал 2 выполнен из высоколегированной стали и снабжен шлицами для вмонтирования в соединительный вал тормозной установки. К трем, равно отстоящим друг от друга, буртикам вала приварены диски 1 из немагнитной стали, к которым в свою очередь приварены надетые на них цилиндры 4 ротора датчика, выполненные из мягкой стали.

После сборки ротора на его цилиндрических образующих выфрезеровывают зубцы, в результате чего он оказывается состоящим из трех колец с зубчатыми венцами (рис. IV.12, б). Поэтому при скручивании вала одинаковые исходные воздушные зазоры δ_1 и δ_2 , полу-

чившиеся в результате фрезеровки, с одной стороны увеличиваются, а с другой — уменьшаются на ту же величину.

Статор 3 датчика выполняют из мягкой стали, он служит для размещения двух катушек 5, охватывающих ротор с возможно малым радиальным зазором ($0,2 \div 0,3$ мм). Магнитный поток каждой из катушек, возникающий вследствие прохождения тока по обмоткам, замыкается через зубцы и воздушные зазоры ротора и через статор. Величиной зазоров между зубцами регулируют магнитное сопротивление

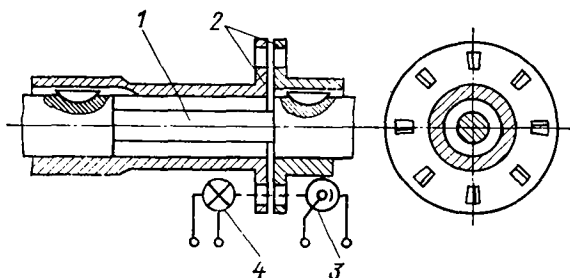


Рис. IV.13. Схема фотоэлектрического датчика для измерения крутящего момента

ние системы, что приводит к изменению индуктивности катушек, пропорциональному скручиванию вала 2 и, следовательно, измеряемому крутящему моменту.

Неподвижная часть датчика опирается на вал через шариковые подшипники. Датчик нечувствителен к возможным изгибам вала, так как небольшие колебания радиального зазора не оказывают заметного влияния на его работу. Тарировку динамометра с таким датчиком выполняют по аналогии с индукционными измерителями крутящего момента.

Фотоэлектрические датчики для измерения крутящего момента двигателя показаны на схеме рис. IV.13. Диски 2 с прорезями жестко посажены на концах базового динамометрического участка 1 соединительного вала тормозной установки. Благодаря наличию у одного из них длинной несущей втулки (ступицы) диски сближены друг с другом. С одной стороны их установлен фотоэлемент 3, с другой — источник света 4 так, что лучи света проходят к фотоэлементу через щели, прорезанные в дисках.

При такой конструкции средняя освещенность фотоэлемента, а следовательно, и сила фототока во время вращения вала определяются взаимным перекрытием щелей в дисках, т. е. зависят от величины скручивания упругого участка вала под действием передаваемого крутящего момента. Импульсы фототока поступают на вход соответствующей электронной схемы, формируются и передаются на указатель динамометра, в частности на ламповый вольтметр.

Фотоэлектрические датчики, работающие в режиме временной модуляции, обеспечивают более точные измерения крутящего момента двигателя. Достигается это с помощью двух одновременно

действующих фотопреобразователей, освещенность которых одинакова и постоянна. Поэтому оба они посылают одинаковые по длительности электрические импульсы в измерительную цепь. Но поскольку фотоэлементы устанавливают на концах базового упругого участка соединительного вала, то вследствие закручивания последнего электрические импульсы их сдвигаются относительно друг друга на величину времени $\tau = k \Delta\phi$, пропорциональную крутящему моменту. Принципиальная схема динамометра аналогична схеме с двумя индукционными преобразователями (см. рис. IV.11).

В отличие от механических и гидравлических, электрические динамометры могут быть применены в тормозных установках любого типа. Но тарировку их чаще всего выполняют с помощью неэлектрических динамометров. Поэтому точность электрических динамометров всегда бывает ниже точности своих эталонов.

§ IV. 3. Механические тормоза

Устройство и принцип действия механического тормоза, так называемого колодочного типа, можно понять по схеме, показанной на рис. IV. 1. Известны также механические фрикционные тормоза других типов. Все они отличаются исключительной простотой, но имеют малую энергоемкость, вследствие чего ранее их применяли при испытании сравнительно маломощных и тихоходных двигателей.

Для торможения современных автомобильных и тракторных двигателей тормоза этого типа применяют иногда только как вспомогательные. Так, фирма «Хинан Фруд» по отдельному заказу поставляет механический тормоз в виде приставок к своему гидравлическому тормозу. В этом случае механический тормоз устанавливают на соединительный вал основного тормоза и кратковременно используют на режимах, когда тормозная мощность гидравлического тормоза недостаточна.

В механическом тормозе мощность, развиваемая двигателем, расходуется на преодоление трения, поэтому шкив и колодки быстро нагреваются и нуждаются в интенсивном охлаждении, а также в небольшой, строго нормированной подаче масла на поверхности трения. Иначе коэффициент трения во время испытаний изменится, что вызовет крайне неустойчивую работу установки.

Однако основная причина неустойчивой работы механического тормоза состоит в неблагоприятной закономерности протекания его характеристики. Дело в том, что момент силы трения в таких тормозах определяется лишь величиной давления колодок на шкив, т. е. затяжкой болтов. При неизменной затяжке болтов момент силы трения практически сохраняется постоянным на всех скоростных режимах. Соответственно с этим мощность, поглощаемая тормозом, изменяется прямо пропорционально числу оборотов вала, т. е. $N_T = an$, где a — постоянное число, тогда как крутящий момент двигателя при изменении скоростного режима изменяется по некоторой кривой, нарастая, а затем снижаясь по мере увеличения оборотов вала.

Поэтому равновесное состояние тормозной установки с данной затяжкой болтов можно обеспечить только при строго определенном числе оборотов вала. Малейшее случайное изменение величины крутящего момента двигателя приводит к изменению числа оборотов вала и нарушению принятого режима работы. Это требует непрерывной подрегулировки затяжки болтов и усложняет проведение испытаний. В силу указанных недостатков и крайней примитивности механических фрикционных тормозов они утратили самостоятельное значение.

§ IV.4. Гидравлические тормоза

Действие гидравлических тормозов основано на использовании свойств различных гидравлических машин, позволяющих, в частности, создавать сопротивление поступательному или вращательному движению элементов соединяемых с ними других машин. Такую возможность гидромашин широко используют также в целях создания требуемого сопротивления вращению вала двигателей внутреннего сгорания, т. е. для искусственного нагружения или, как говорят, торможения их при стендовых испытаниях.

Гидравлические тормоза обладают высокой энергоемкостью и допускают глубокое регулирование по нагрузке и числам оборотов вала. По характерным особенностям протекающих в их рабочей полости гидродинамических процессов различают динамические и объемные гидравлические тормоза.

Объемного типа тормоза представляют собой поршневые гидравлические машины, в том числе с вращающимися поршнями. В лабораториях двигателей из этой группы тормозов применяют иногда шестеренчатые (шестеренчатые насосы).

Динамического типа тормоза по особенностям конструкции разделяют на дисковые, штифтовые, лопастные и др. Для торможения двигателей обычно применяют названные три разновидности динамических тормозов. Мощность, развиваемая двигателем, затрачивается в них на увеличение кинетической энергии струек воды, поступающей в статор, и нагрев ее в результате трения о детали и внутри жидкости, а также на преодоление трения в подшипниках и сальниках, возникающего вследствие вращения ротора. В итоге механическая энергия двигателя в гидравлическом тормозе превращается в тепловую.

Количество тепла, выделяющееся при торможении, можно определить, исходя из того, что $1 \text{ л. с.} = 75 \text{ кгс} \cdot \text{м/с}$, а часовая работа $1 \text{ л. с.} \cdot \text{ч} = 75 \cdot 3600 = 270\,000 \text{ кгс} \cdot \text{м}$ или 1130 МДж . Так как $1 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 1/427 \text{ ккал}$, то $1 \text{ л. с.} \cdot \text{ч} = 270\,000/427 = 632 \text{ ккал}$.

Следовательно, развиваемая двигателем и поглощаемая тормозом эффективная мощность $N_e \text{ л. с.}$, в течение 1 ч работы эквивалентна $632 N_e \text{ ккал}$ ($2,64 N_e \text{ МДж}$) тепла. За это же время количество тепла (ккал/ч), выносимое из тормоза с водой,

$$Q_h = G_h (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) c,$$

где G_h — количество воды, проходящей через тормоз в течение 1 ч, л/ч; $t_{вх}$ и $t_{вых}$ — соответственно температура воды на входе и выходе из тормоза, °С; c — теплоемкость воды, равная примерно 1 ккал/(л °С).

Очевидно, оптимальное тепловое состояние тормоза можно поддерживать только в случае, если соблюдается равенство

$$G_h c (t_{вых} - t_{вх}) = 632 N_e,$$

выражающее тепловой баланс тормоза, из которого и определяют количество воды (л/ч), требующееся для поглощения мощности двигателя в течение 1 ч его работы

$$G_h = 632 N_e / [c(t_{вых} - t_{вх})].$$

Опыт эксплуатации гидравлических тормозов показывает, что температуру воды на выходе $t_{вых}$ следует поддерживать на уровне $50 \div 60^\circ \text{С}$. Иначе повышенное парообразование, а также возможности возникновения кавитации и отложения накипи могут нарушить стабильность работы тормозной установки. Известная фирма «Хинан Фруд» в крайнем случае

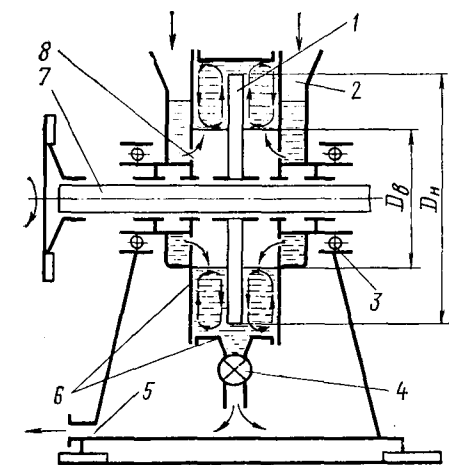


Рис. IV.14. Схема гидравлического дискового тормоза

допускает повышение температуры воды в тормозах ее конструкции до 65°С и даже до 75°С , но предупреждает, что неизбежное разрушение деталей вследствие коррозии и кавитации уменьшает долговечность тормозов. Как установлено, оптимальный нагрев тормоза не должен превышать 60°С . Тогда при $t_{вх} = 15^\circ \text{С}$ расход воды $\{ \text{л}/(\text{л} \cdot \text{с} \cdot \text{ч}) [\text{л}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})] \}$ через тормоз

$$g_h = G_h / N_e \approx 14 \div 18 (19 \div 24).$$

Поэтому подавать воду в тормоз следует в строгом соответствии с поглощаемой им мощностью.

В зависимости от типа и особенностей конструкции тормозов поступающая в них вода заполняет при работе или всю их внутреннюю полость, или только часть ее. По этому признаку различают тормоза с полным (сплошным) и частичным заполнением водой. Следует, однако, заметить, что такая классификация условна и отражает лишь случаи работы тормозов с полной нагрузкой. На малых нагрузках, как будет показано далее, тормоза всех типов работают с частичным заполнением водой.

Устройство и принцип действия простейшего динамического гидротормоза можно понять на примере дискового тормоза (рис. IV.14). Ротор 1 тормоза выполнен в виде гладкого диска и жестко закреплен

на валу 7, который соединяют с валом испытуемого двигателя. Вал вместе с ротором, состоящим из одного или нескольких дисков, заключают в закрытый кожух-статор, имеющий возможность совершать угловые перемещения на шариковых подшипниках 3. Вода в тормоз, точнее в его статор 6, подается через приемные воронки 2 и отверстия 8. Последние размещают с учетом необходимости ввода воды в зону ступицы ротора. Нагревшуюся при работе воду отводят через регулировочный вентиль 4 и отверстие 5 в плите корпуса тормоза.

При вращении ротора-диска 1 на его плоскостях возникают силы трения, вследствие чего вода увлекается диском и центробежной силой отбрасывается от центра к периферии. В результате давление воды в зазоре между вращающимся диском и неподвижной стенкой статора возрастает пропорционально квадрату расстояния от оси вращения.

В пограничном слое у поверхности диска угловая скорость движения частиц воды больше, чем в толще ее, и в то же время по поверхности диска частицы перемещаются от центра к периферии. На подходе к стенкам, образующим цилиндрическую полость статора, частицы затормаживаются, и радиальный градиент давления начинает преобладать над центробежными силами, вследствие чего в пограничном слое у боковых стенок статора возникает радиальное перетекание частиц в обратном направлении (от периферии к центру). В конечном итоге, в статоре образуется вихревое движение воды по схеме, показанной стрелками на рис. IV.14, а ротор оказывается постоянно погруженным частью своей поверхности в толщу кольцевого слоя воды. Чем больше радиальная толщина слоя воды, тем большая часть поверхности диска участвует в активной работе трения о воду и выше эффективность торможения.

Степень наполнения тормоза определяется коэффициентом наполнения

$$\varphi = (D_n - D_v)/D_n = 1 - D_v/D_n,$$

где D_n — наружный диаметр погружения, равный диаметру ротора-диска; D_v — внутренний диаметр кольцевого слоя воды (рис. IV.14).

Коэффициент φ характеризует величину активной части диска и определяет возможность регулирования нагрузки тормоза. Оптимальным является $\varphi = 0,5$. При значениях $\varphi > 0,5$ эффективность торможения почти не повышается, так как внутренний диаметр D_v водяного кольца уменьшается настолько, что заметно снижается окружающая скорость движения частиц воды на внутренней его стороне.

Очевидно, скорость вихревого движения воды в тормозе устанавливается из условий равенства кинетической энергии, приобретаемой водой от ротора-диска 1, и энергии, отдаваемой ею статору 6 вследствие трения о его стенки при возвращении к центру. Поэтому момент силы трения воды о стенки статора равен крутящему моменту, прилагаемому к валу 7 ротора 1. Под действием этого момента статор 6 поворачивается на подшипниках 3, и для его уравнивания необходимо приложить силу P на плече l рычага тормоза. Тогда момент, развиваемый тормозом, $M_t = Pl$. Поскольку величина плеча l рычага

тормоза известна, то, измеряя величину силы P , найдем момент M_T и, следовательно, равный ему момент $M_{кр}$, развиваемый двигателем.

В измеряемую величину M_T входит также реактивный момент, возникающий вследствие трения в подшипниках скольжения вала ротора и сальниках, уплотняющих вал, которые, как правило, размещают в боковых крышках статора. Трение в шариковых подшипниках, несущих сам статор, не регистрируется динамометром тормоза, но величина момента от трения в этих подшипниках составляет всего 0,01—0,02% от измеряемого момента, поэтому не оказывает на него практического влияния.

Аналитическое выражение для оценки сопротивления, создаваемого гидравлическим тормозом и поглощаемой им мощности, в зависимости от размера и числа оборотов n его диска определяют в предположении, что у поверхности диска имеет место преимущественно турбулентное течение жидкости. При плотности ρ жидкости и ее кинематической вязкости ν [19]

$$N_T = k_T \rho \nu^{0.2} (D_H^{4.6} - D_E^{4.6}) n^{2.8},$$

где k_T — обобщенный коэффициент тормоза, учитывающий характер течения и все постоянные величины, входившие в исходное выражение. В тормозах с гладкими дисками и стенками статора коэффициент $k_T = 0,017$; для перфорированных дисков и шероховатых (сотовидных) стенок статора — $k_T = 0,118$.

Таким образом, в гидравлических тормозах дискового типа поглощение мощности в зависимости от числа оборотов вала теоретически происходит по закону кубической параболы и пропорционально разности примерно пятых степеней наружного и внутреннего диаметров кольцевого слоя воды в статоре.

Указанную теоретическую зависимость, а равно, и зависимость тормозного момента от числа оборотов вала называют *характеристикой тормоза*. Различают два вида характеристик: теоретические и действительные.

Теоретическая характеристика гидравлических тормозов динамического типа в общем виде представляет собой параболу и с достаточной точностью может быть выражена уравнением

$$N_T \approx a n^3,$$

где $a = k_T \rho D^5$ — коэффициент пропорциональности, являющийся постоянной величиной для данного тормоза при полном заполнении его водой и неизменном положении регулирующих органов; D — активный диаметр ротора, м.

Действительная характеристика гидротормоза позволяет судить о возможности его применения для торможения конкретного двигателя. Такую характеристику часто называют *внешней* и изображают в виде графика, описывающего изменения мощности в зависимости от изменения числа оборотов вала, как показано на рис. IV.15.

Когда характеристика двигателя располагается выше линии bc , то тормоз вообще не может быть использован, так как не подходит по мощности. Желательно, чтобы характеристика N_e вписывалась, как показано, например, на рисунке.

зом, т. е. тормозной момент, достигает наибольшей величины, исходя из которой ведут расчет на прочность его ротора и статора. На участке, ограниченном прямой линией ab характеристики, величина крутящего момента остается неизменной и равной его значению в точке a . Увеличение мощности до уровня b происходит за счет роста числа оборотов вала и ограничивается допускаемой температурой нагрева воды в тормозе. Поэтому на участке bc мощность сохраняется постоянной, а обороты увеличиваются вследствие уменьшения тормозного момента. Точка c соответствует максимально допускаемому числу оборотов ротора, обусловленному его прочностью вследствие действия центробежных сил. Контурная линия cd характеризует уменьшение тормозной мощности при постоянном максимально допускаемом числе оборотов ротора.

Нижний предельный участок характеристики, ограничиваемый линией do , соответствует минимальной тормозной мощности, поглощаемой при отсутствии воды в тормозе, и обуславливается сопротивлением воздуха вращению ротора, трением в подшипниках, уплотнениях и т. д.

Кривые oa' , ob' , oc' и od' — соответствуют частичному заполнению тормоза водой при различных постоянных положениях его регулировочного органа. Так, изменяя положение этого органа, можно

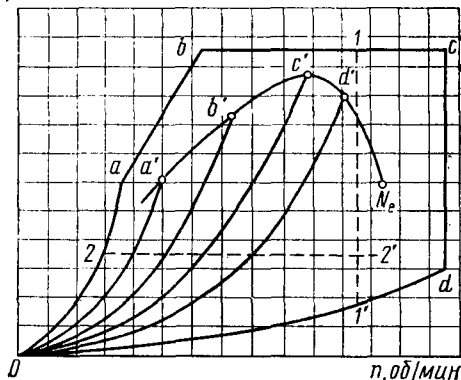


Рис. IV.15. Характеристика гидравлического тормоза

получить мощность, соответствующую точкам a' , b' , c' , d' , т. е. снять скоростную характеристику двигателя. Линии 1—1', 2—2' соответствуют характеристикам двигателя, снимаемым при постоянных значениях числа оборотов вала или мощности. Таким образом, изменяя положение регулировочного органа тормоза, можно в пределах его рабочей области задавать различные скоростные или нагрузочные режимы, допускаемые для испытуемого двигателя.

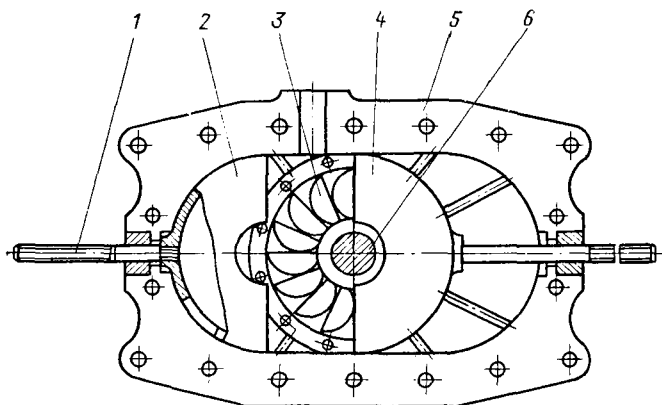


Рис. IV.16. Ротор и регулирующие заслонки гидравлического тормоза «Фруд»

Регулирование гидравлических тормозов динамического типа осуществляют двумя методами: изменением активной поверхности ротора, т. е. изменением величины его поверхности, входящей в зону организованной циркуляции воды в статоре, и изменением количества воды, поступающей в статор под постоянным или переменным регулируемым давлением.

В тормозах с частичным заполнением регулирование нагрузки, как отмечалось уже, достигают изменением радиальной толщины водяного кольца, формирующегося в статоре при вращении ротора, либо за счет изменения положения сливного отверстия относительно оси статора, либо изменением подачи воды в статор. Но в итоге в обоих случаях изменяют все-таки величину активной или так называемой смачиваемой поверхности ротора. В практике, особенно при выходе на нужный режим испытаний, применяют оба метода одновременно, причем доводочным из них служит метод регламентирования подачи воды, как более тонкий. Часто с этой целью на входе в каждую приемную воронку тормоза (карман) устанавливают дополнительные вентили малого расхода.

В тормозах с полным заполнением статора водой ротор целиком бывает погружен в воду или вся его рабочая поверхность омывается ею при вращении. Активную поверхность его уменьшают с помощью заслонок-шиберов, которые специальным винтовым механизмом вводят в зазоры между рабочими поверхностями статора и ротора.

Действие и устройство такого регулирующего механизма можно понять по рис. IV.16, на котором показаны отдельные элементы тормоза «Фруд».

Ротор 3 с двух сторон охватывается шиберами 2 и 4. Каждый из них имеет винтовой шток 1, с помощью которого им сообщают возвратно-поступательные перемещения в плоскости, перпендикулярной оси 6 ротора. Перемещения шиберов строго синхронизируются системой шестерен, кинематически связанных с общим для них штурвалом управления тормозом. Для большей наглядности шибер 2 показан на рисунке в положении, когда ротор открыт полностью и вся его поверхность является активной, поскольку между ним и рабочими стенками статора 5 нет разделяющих заслонок. Наоборот, шибер 4 находится в положении, при котором ротор почти полностью прикрыт заслонками и работает с минимальной величиной активной поверхности, что соответствует малым нагрузкам.

Описанный метод выключения части поверхности ротора из активной работы используют в сочетании с методом ограничения воды, поступающей в статор из сети с постоянным напором. На входе и выходе из статора тормоза рассматриваемого типа имеют регулировочные вентили, с помощью которых испытатели поддерживают необходимое давление во внутренней полости тормоза и регулируют количество воды, проходящей через тормоз, поддерживая нагрев ее в допускаемых пределах.

В отличие от тормозов с частичным заполнением, в тормозах с полным заполнением водой нагрузку можно регулировать, совсем не затрагивая активную поверхность ротора. Поверхность его полностью при этом омывается потоками воды на всех режимах, а нагрузку регулируют путем изменения количества воды, поступающей в тормоз. Поэтому тормозная мощность предопределяется лишь массой воды, циркулирующей по рабочим поверхностям ротора и статора, и зависит от давления воды на входе в активную полость статора. С уменьшением количества воды, поступающей в статор, и снижения ее давления в системе тормозная мощность уменьшается до желаемого уровня. Такой метод применен, например, в новых моделях G и GB тормоза «Фруд».

Следует отметить, что любой из описанных методов регулирования оправдывает свое назначение при условии, что вода в тормоз подается с определенным напором из бака постоянного уровня или из отдельного насоса, поддерживающего заданное давление, либо обеспечивающего регулирование давления в нужных пределах в зависимости от его назначения.

Дисковые тормоза работают с частичным заполнением статора водой (см. рис. IV.14), допуская скорости в 15—60 тыс. об/мин. Такие скорости необходимы, в частности, для установок испытания агрегатов турбонаддува двигателей.

Примером многодисковой конструкции может служить тормоз МАИ. Ротор его состоит из четырех перфорированных дисков, установленных на общей ступице, и вращается в статоре, образованном тремя неподвижными дисками и распорными кольцами. Диски

статора литые, выполнены с сотовидными рабочими поверхностями. По сравнению с гладкими подвижными и неподвижными дисками сочетание перфорированных дисков ротора и сотовидных стенок статора увеличивает тормозной эффект в 8—10 раз.

Тормоз снабжен динамометром маятникового типа (рис. IV.17, а), причем в последних моделях с циферблатным указателем.

Дисковые регулировочные золотники тормоза имеют диаметр, равный примерно четверти диаметра дисков ротора (рис. IV. 17, б).

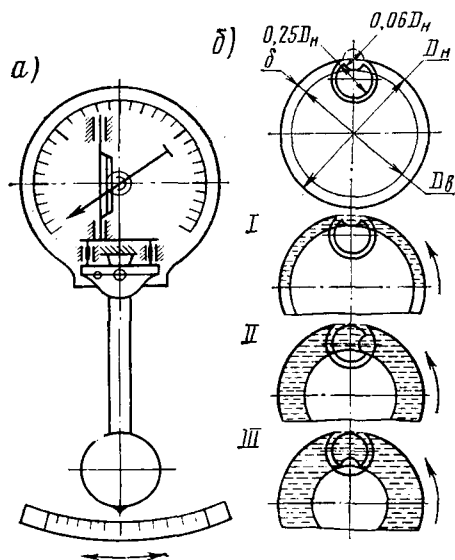


Рис. IV. 17. Элементы тормоза МАИ:

а — маятниковое весовое устройство с циферблатным указателем; б — конструкция диска регулирования наполнения тормоза МАИ и схема его работы

В зоне обода золотников сделан вырез — окно для слива воды. Регулирование слива воды заключается в поворачивании золотников около оси на 180° с помощью червячной пары и маховичков. Когда золотники повернуты в положение I (рис. IV.17, б), в тормозной камере образуется водяное кольцо с минимальной радиальной толщиной δ , которое увеличивается по мере перемещения окна ближе к оси тормоза (см. положения II и III). Во всех положениях проходное сечение сливного окна остается неизменным, что способствует стабилизации торможения и облегчает настройку на требуемый режим по сравнению со способами заполнения статора и слива из него воды, основанными на дросселировании каналов.

Тормоза МАИ реверсивны (могут вращаться в любую сторону), достаточно устойчивы в работе, бесшумны и просты в обслуживании. Однако менее энергоемки, чем штифтовые и тем более лопастные.

Штифтовые тормоза имеют ротор, выполненный в виде барабана 1, на ободе которого в несколько рядов расположены стальные трехгранные штифты 3. В балансирно подвешиваемом на стойках 7 статоре 2 с внутренней его стороны укреплены такие же штифты, между которыми с некоторым зазором проходят штифты вращающегося ротора (рис. IV.18, а, б).

Показанный на рисунке штифтовой тормоз «Юнкерс» работает, как и дисковый, по принципу частичного заполнения. Вода в статор подается через боковые карманы 4 к ступице ротора, захватывается им при вращении и отбрасывается к периферии барабана 1, проходит через отверстие в ободе барабана и образует кольцевой слой, который увлекается его штифтами во вращательное движение. Однако штифты

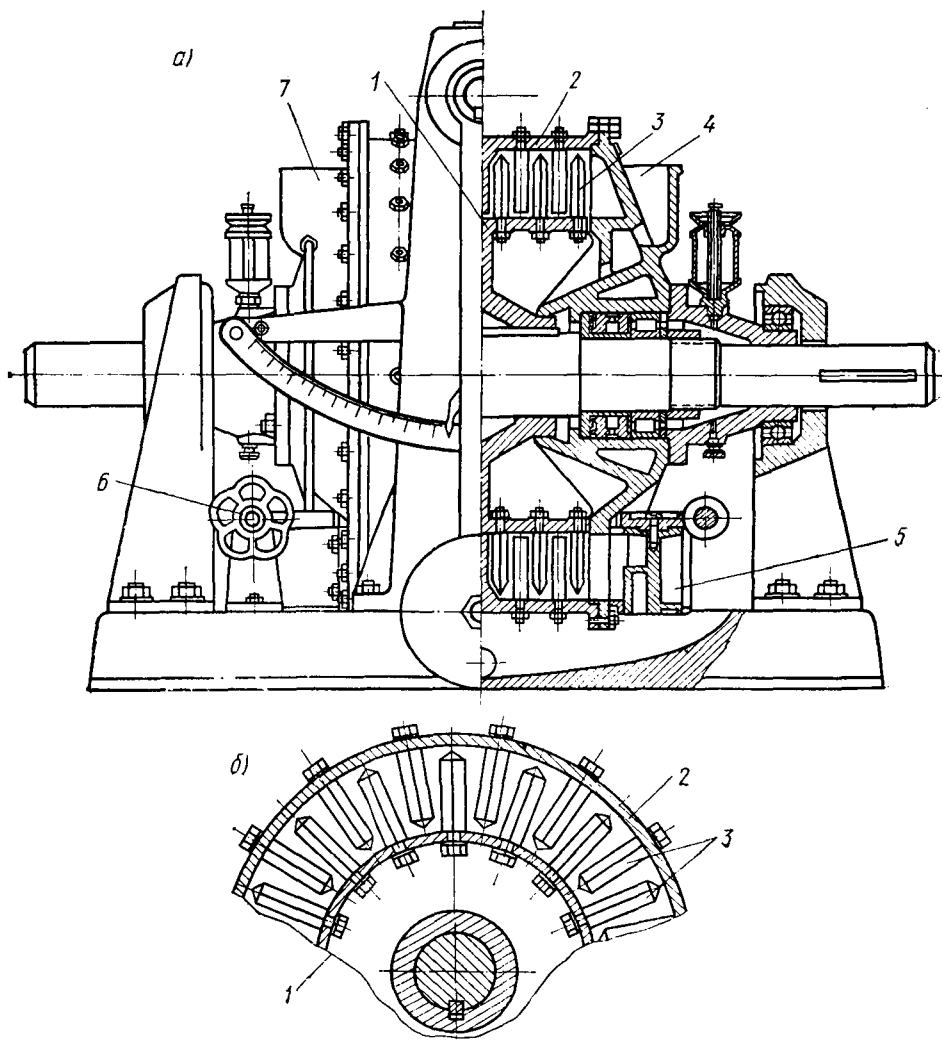


Рис. IV.18. Гидравлический тормоз «Юнкерс»
 а — продольный разрез; б — штифты ротора и статора

статора препятствуют этому и непрерывно рассекают кольцевой слой воды, оказывая сопротивление вращению ротора.

Реакция всех сил сопротивления вращению ротора, включая также трение в подшипниках и сальниках последнего, передается на статор и стремится повернуть его в направлении вращения. Опрокидывающее действие реактивных сил уравнивается грузом маятникового динамометра.

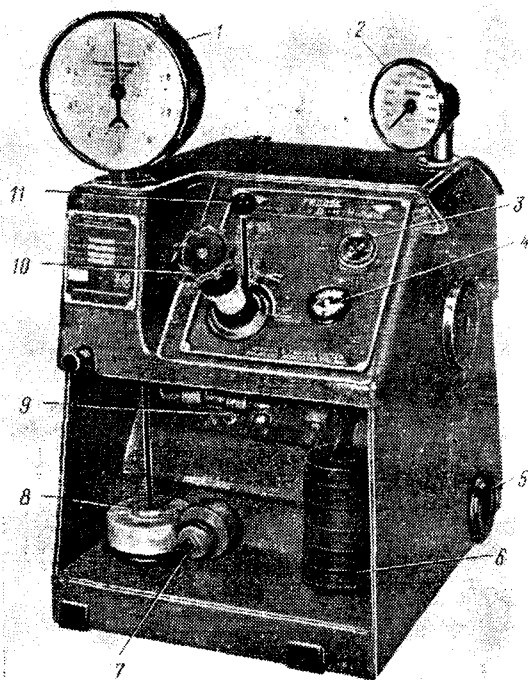


Рис. IV.19. Гидравлический тормоз «Фруд» модели G4-1:

1 — весовая головка; 2 — тахометр; 3 — термометр контроля температуры воды на выходе из тормоза; 4 — регулятор температур; 5 — выпуск воды (с двух сторон); 6 — гири добавочные (черного цвета); 7 — отверстие ввода воды (с двух сторон); 8 — гири предварительной нагрузки (красного цвета); 9 — фиксатор рычага; 10 — маховик для ручного управления нагрузкой; 11 — рычаг для снятия нагрузки

Подвод воды, как и в тормозах МАИ, должен быть равномерным, с постоянным напором, что обеспечивается с помощью бака постоянного уровня с поплавковым механизмом, поднятым на 3—4 м над осью тормоза.

Отвод воды из статора производится через отверстие в нижней зоне боковой крышки статора и регулируется полым цилиндриче-

ским золотником 5. На боковой поверхности цилиндра золотника сделан косой вырез, через который вода поступает во внутреннюю полость его и оттуда отводится, например, в канализацию. Положение золотника регулируют с помощью маховичка 6.

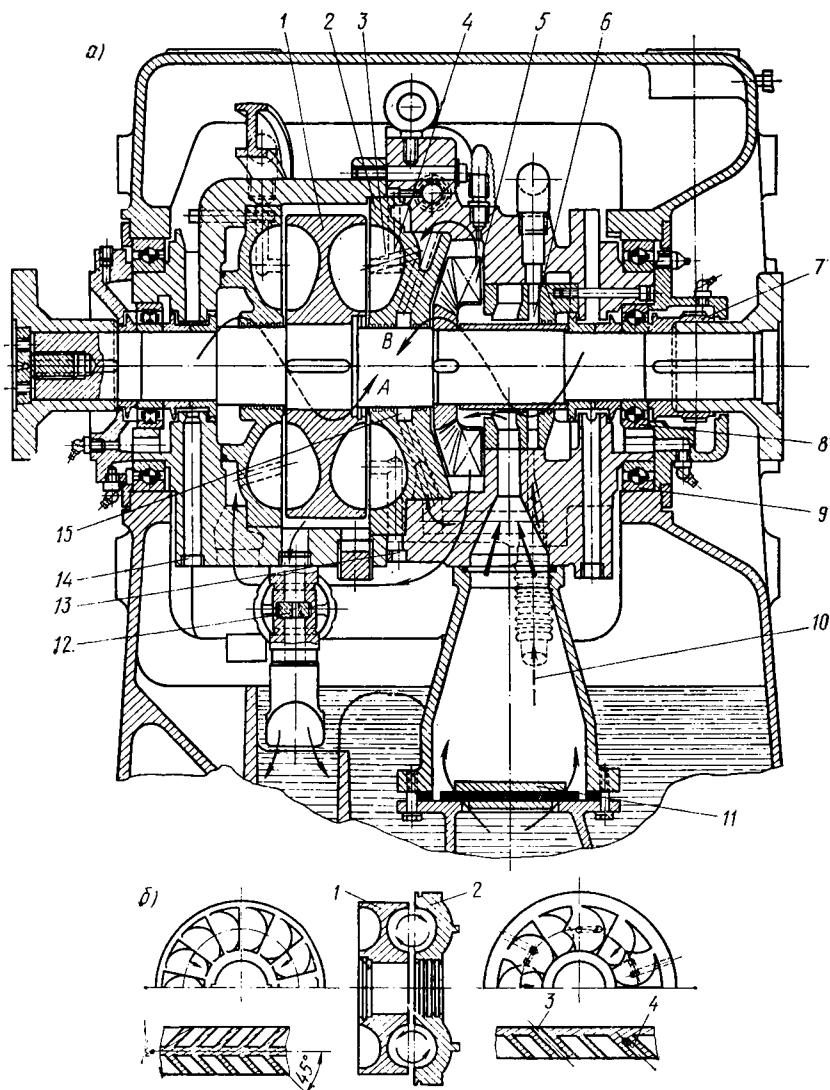


Рис. IV.20. Продольный разрез гидравлического тормоза «Фруд» модели G4-1 (а), его ротор и вкладыши (б) статора

Тормоза «Юнкерс» реверсивны. Наличие в них штифтов дает большой тормозной эффект, снижает габариты тормоза, но при больших нагрузках штифты вибрируют и увеличивают шум испытатель-

ной установки. Кроме того, случайное ослабление крепления штифтов может привести к серьезной аварии. Поэтому в быстроходных тормозах штифты выполняют заодно с барабаном.

Лопастные тормоза работают по принципу полного заполнения статора водой. Это выгодно отличает их от дисковых и штифтовых, в которых с уменьшением радиальной толщины кольцевого слоя воды возникают определенные трудности с регулированием нагрузки, вследствие чего утрачивается устойчивость торможения. Особенно резко нарушения устойчивости проявляются на режимах работы с малым наполнением, когда в воду погружается лишь небольшая часть дисков или штифтов. Самые незначительные при этом отклонения в режиме подачи воды влекут за собой резкие колебания тормозного момента.

В лопастных тормозах при соответствующих режимах работы ротор бывает либо целиком погружен в воду, либо вся его поверхность омывается потоками воды, циркулирующими в статоре. Благодаря этому в любом случае создаются условия для более стабильного торможения на всех нагрузочных режимах, включая самые малые. Из гидравлических тормозов лопастные наиболее энергоемки.

Новая модель лопастного тормоза «Фруд» типа G 4-1 показана на рис. IV.19 и рис. IV.20, а. От прежней, широко известной модели DPX, модель G отличается тем, что не имеет традиционных заслонок шиберов. Для регулирования нагрузки тормоза в конструкцию введены клапан управления нагрузкой и центробежный насос, рабочее колесо которого жестко посажено на вал ротора. Уплотнение вала выполнено без скользящих сальников с одними лишь лабиринтными и гидравлическими подпорными устройствами. Кроме упрощения обслуживания, это уменьшает износ вала и снижает потери на трение в механизмах. Все устройства тормоза вместе со статором заключены в общий кожух, который служит для него плитой. Поэтому тормоз модели G представляет собой компактную современную конструкцию.

Тормоз рассчитан на скорость вращения вала до 6000 об/мин, он развивает тормозную мощность 300 л. с. (≈ 220 кВт) при вращении вала в сторону стрелки А и 150 л. с. (≈ 110 кВт) — в сторону стрелки В (рис. IV.20). В этом смысле тормоз не реверсивен, поскольку большую тормозную мощность развивает при вращении вала только в одну определенную сторону. Однако такая особенность конструкции имеет свои положительные свойства, поскольку значительно расширяет возможности ее для торможения двигателей различных классов.

Ротор 1 тормоза, изготовленный из чугуна, имеет диаметр 244,5 мм и выполнен с обычными для него углублениями полуэллиптической формы на обеих его боковых поверхностях (рис. IV.20). Такой же формы сделаны углубления на рабочих поверхностях обеих вкладышей 2 статора. Углубления равномерно разделены на ковшеобразные ячейки радиальными лопатками, расположенными под углом 45° к оси тормоза (рис. IV.20, б). Ротор имеет 14, а вкладыши статора по 12 таких ячеек. В шести лопатках вкладышей статора сделаны отверстия

3 для подвода воды в рабочую полость тормоза, воздух из которой при заполнении отводится через отверстия 4 и каналы 13.

При вращении ротора вода под действием центробежной силы движется от центра к периферии его ячеек и, благодаря полуэллиптической форме, по выходе из них отбрасывается в ячейки вкладышей статора, по которым возвращается к центру и вновь захватывается ротором и т. д., образуя круговорот, показанный стрелками на

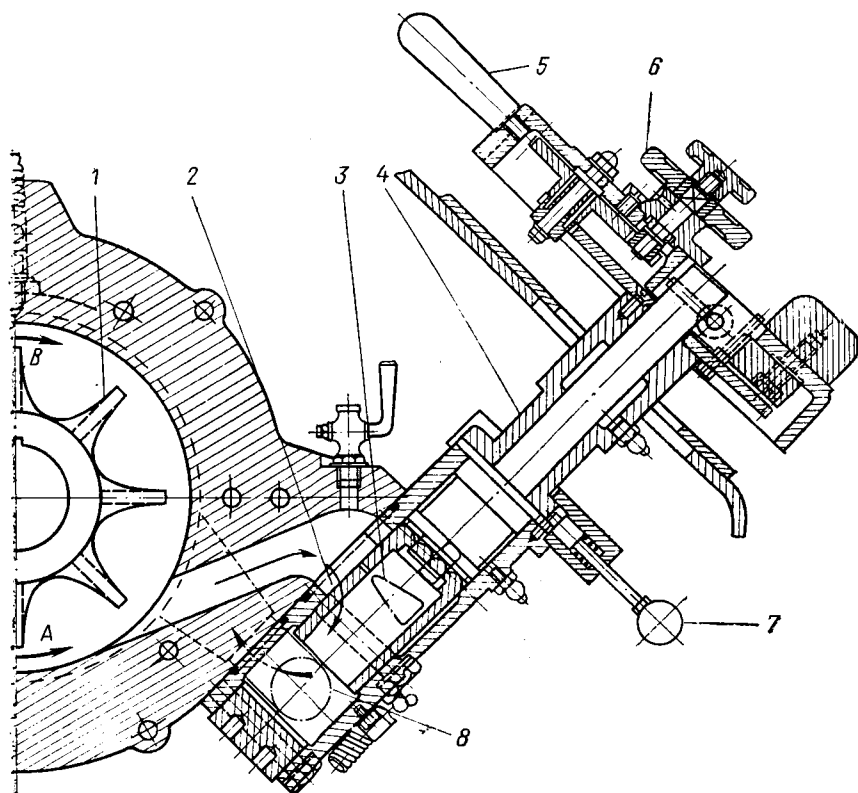


Рис. IV.21. Механизм управления нагрузкой в тормозе «Фруд» модели G4-1:

1 — рабочее колесо центробежного насоса; 2 — золотник управления нагрузкой; 3 — регулируемое отверстие клапана нагрузки; 4 — корпус клапана; 5 — рычаг снятия нагрузки; 6 — маховичок ручного управления; 7 — фиксатор рычага; 8 — отверстие для подачи воды в статор тормоза

рис. IV.20, б. При движении по ячейкам ротора вода приобретает кинетическую энергию и отдает ее в виде работы трения о стенки ротора и статора, а также в виде потерь, вызываемых ударами вследствие перехода потоков от ротора к статору и обратно. В результате этого, а также трения внутри жидкости сопротивления колеса 5 центробежного насоса, трения в шариковых и роликовых подшипниках 8 и 9 вала и потерь на привод тахометра шестернею 7 вся механи-

ческая энергия испытуемого двигателя превращается в тормозе в тепловую, нагревающую воду и остов тормоза.

Типичный для прежних моделей тормозов «Фруд» механизм регулирования нагрузки посредством заслонок-шиберов, показанный на рис. IV.16, на режимах малых и очень малых нагрузок, как отмечалось, не обеспечивает нужного торможения без одновременного ограничения количества воды, поступающего в полость статора. Новый регулирующий механизм тормоза основан только на изменении объема воды, проходящего через эту полость на всех режимах работы. Достигается это изменением проходного сечения отверстия клапана управления нагрузкой, который размещен между подающим центробежным насосом и рабочей полостью статора. Конструкция механизма с клапаном управления нагрузкой показана на рис. IV.21.

При вращении вала по стрелке *A* вода через автоматический клапан *11* (рис. IV.20, *a*) поступает на лопасти рабочего колеса насоса и направляется им по касательно расположенному нагнетательному каналу к клапану *2* управления нагрузкой (рис. IV.21). Из этого клапана вода прокачивается в полость, окружающую вкладыши статора, откуда через отверстия в лопастях статора под давлением поступает в его рабочую полость.

Количество воды, пропускаемое клапаном управления к ротору тормоза, согласуется с режимом испытания. Поэтому рабочая полость тормоза не всегда заполняется полностью водой. На малых нагрузках к ротору подается соответствующий небольшой объем воды, которая тонким слоем циркулирует по поверхностям ковшеобразных ячеек ротора и статора, обеспечивая нужную тормозную мощность.

В обычных условиях испытаний нагретая вода отводится из статора через дренажное отверстие в выпускном клапане *12*, расположенном в его нижней части (рис. IV.20). Скорость вытекания воды из дренажного отверстия зависит от давления в периферийной зоне статора, возрастающего в связи с вихревым движением воды. Сам выпускной клапан приоткрывают вентилем только в необходимых случаях для понижения температуры нагрева воды в статоре. Делается это с предельной осторожностью и должно компенсироваться изменением положения клапана управления нагрузкой, чтобы не нарушить режим испытания.

Кроме дренажного отверстия, некоторое количество горячей воды вытекает из статора через лабиринтные уплотнения вала. Со стороны подающего насоса просочившаяся горячая вода попадает в кольцевую уплотнительную проточку *15*, где смешивается с холодной водой, поступающей в эту проточку из канала *10*, питающего систему *6* уплотнения статора водой; с другой стороны горячая вода попадает в полость, окружающую вкладыши *2* статора, и вновь возвращается в рабочую полость тормоза. Вода, просочившаяся к подшипникам вала ротора, отводится по дренажным каналам *14*. Подшипники *9* статора изолированы от попадания в них воды.

Так как рабочее колесо *5* подающего насоса расположено на валу ротора, то с изменением числа его оборотов пропорционально изменяется и подача воды в статор при данном положении клапана упра-

вления нагрузкой. Это автоматически компенсирует интенсивность вытекания воды из статора вследствие изменения в нем давления при колебании скорости вращения вала и одновременно позволяет более успешно стабилизировать случайные отклонения от принятого скоростного режима испытуемого двигателя.

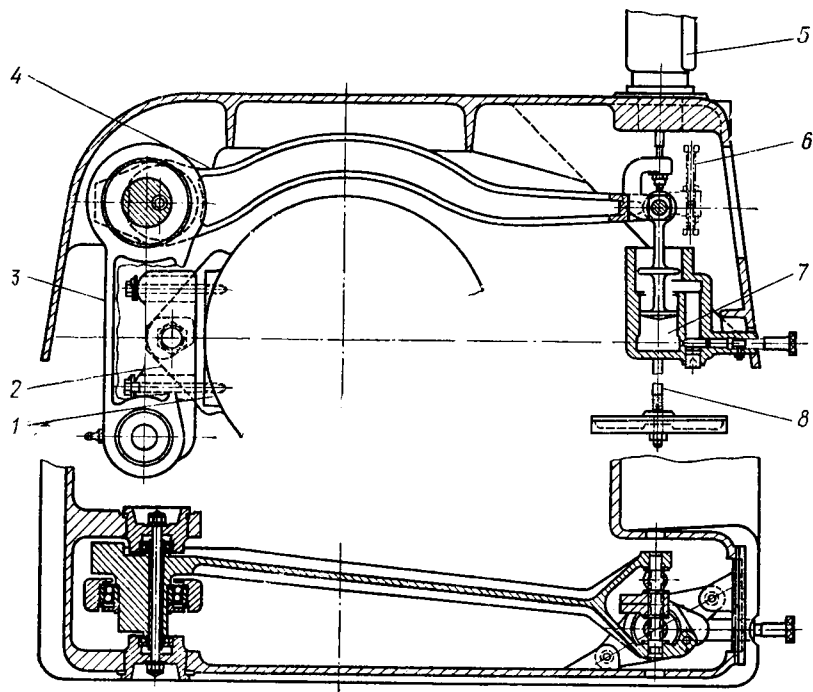


Рис. IV.22. Динамометр тормоза «Фруд» модели G4-1:

- 1 — корпус статора тормоза; 2 — баланси́р; 3 — соединительное звено; 4 — рычаг;
5 — весовая головка; 6 — упоры, ограничивающие перемещения рычага 4;
7 — амортизатор; 8 — стержень для гирь

Клапан управления нагрузкой по желанию снабжают электрическим сервомотором, обеспечивающим дистанционное управление тормозом.

При давлении в сети волопровода, превышающем $1,0 \div 1,3 \text{ кгс/см}^2$ ($\approx 0,1 - 0,13 \text{ МН/м}^2$), рекомендуется прикрывать вентиль на входе в приемный канал 7 тормоза (см. рис. IV.19) с тем, чтобы не перегружать его уплотнения. Минимальное рабочее давление в канале 7 составляет $0,55 \text{ кгс/см}^2$ ($\approx 0,055 \text{ МН/м}^2$). Воду на входе в автоматический клапан 11 (см. рис. IV.20) питания тормоза пропускают через фильтр, так как загрязнение механизмов тормоза сокращает их долговечность.

Динамометр тормоза снабжен пружинной весовой головкой (рис. IV.22). При вращении вала по стрелке А динамометр предварительно нагружают специальной гирей (красного цвета). Диапазон

измерений увеличивают с помощью добавочных гирь (черного цвета), запас которых хранится рядом на штативе.

Мощность (л. с.), развиваемая двигателем,

$$N_e = Qn/k = Qn/200,$$

где Q — суммарный вес, т. е. показание стрелки весов плюс вес добавочных гирь; n — число оборотов вала в минуту.

Весовая головка имеет равномерную шкалу, проградуированную в относительных величинах (единицах) в соотношении 5 : 1 кгс/ед.

При вращении вала по стрелке B динамометр работает во всем диапазоне измерений от 0 до 150 л. с. без гирь предварительного и дополнительного нагружения. Весовое устройство фиксирует непосредственно измеряемую величину.

§ IV. 5. Электрические тормоза

Современные тормоза этого типа представляют собой электрические машины в балансирном исполнении, вал которых соединяют с валом испытуемого двигателя.

Механическая энергия двигателя в таких тормозах преобразуется в электрическую. Но поскольку электрические машины обратимы, то в случае питания электроэнергией от внешнего источника тока они превращаются в электрический двигатель и преобразуют электрическую энергию в механическую. Благодаря этим свойствам электрические тормоза выгодно отличаются от гидравлических и других тормозных устройств.

Электрические тормоза позволяют прокручивать вал испытуемого двигателя, проводить холодную приработку его после сборки, пускать в ход без использования стартера, определять величину механических потерь в нем и т. д. При наличии определенных условий энергию электрических тормозов целесообразно отдавать в общую электрическую сеть лаборатории и таким образом утилизировать механическую энергию испытуемых двигателей внутреннего сгорания. Для торможения двигателей используют машины как переменного, так и постоянного тока, называя их, соответственно, тормозами переменного и постоянного тока [6, 30].

Тормоза переменного тока — это асинхронные или синхронные электрические машины, регулируемые с помощью реостатов и различных машинных преобразователей.

Регулирование реостатами применяют в асинхронных машинах с фазным якорем, в цепь которого включают управляемое сопротивление. Чтобы обеспечить сравнительно плавное регулирование, применяют жидкостные реостаты. Последние отличаются громоздкостью и не совсем удобны в эксплуатации, а главное, не обеспечивают нужных пределов регулирования. Поэтому тормоза переменного тока с реостатным регулированием находят ограниченное применение, например, для торможения при обкатке двигателей, сдачи их после ремонта и для других аналогичных испытаний.

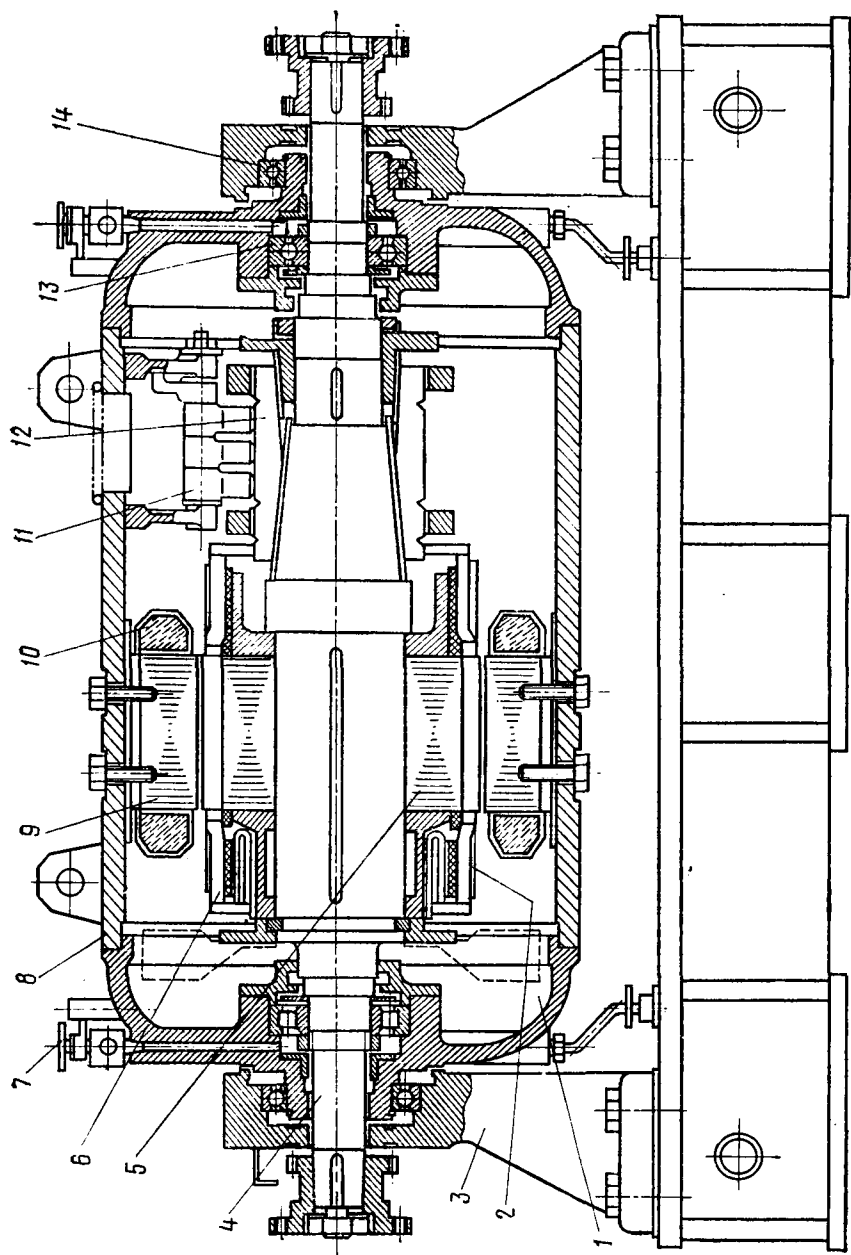


Рис. IV.23. Электрическая балансирующая машина постоянного тока

Регулирование, основанное на применении частотных преобразователей и электромагнитных муфт скольжения, обеспечивает безупречную плавность и нужные пределы изменения режимов, допускает автоматизацию управления, но усложняет тормозную установку. Частотные преобразователи работают в сочетании с асинхронными машинами, имеющими короткозамкнутый якорь. Электромагнитные муфты скольжения применяют совместно как с синхронными, так и с асинхронными машинами. Тормоза с таким регулированием не получили пока большого распространения.

Тормоза постоянного тока базируются на машинах с независимым смешанным возбуждением и одновременном регулировании силы тока в цепи якоря. Такие тормоза отличаются плавностью и широкими пределами регулирования скоростных и нагрузочных режимов. Поэтому они находят преимущественное применение особенно для исследовательских целей.

Общее устройство электрической балансирной машины постоянного тока показано на рис. IV.23. Ее корпус (статор) 1 на шариковых подшипниках 14 установлен на стойки 3. В боковые крышки статора вмонтированы шариковый и роликовый подшипники 13 вала 4 якоря (ротора) 2, смазку к которым подают через капельницы 7. Статор и ротор, имея общую ось вращения, могут совершать угловые перемещения независимо друг от друга.

Для торможения двигателей внутреннего сгорания могут быть использованы также машины постоянного тока небалансирные. Основу как балансирных, так и небалансирных составляет неподвижная их часть — магнитная система — и вращающаяся — якорь.

Магнитная система предназначена для создания магнитного потока и его направления. Она состоит из ярма или станины 8, полюсных сердечников 9 с обмотками возбуждения 10 и железной основы 5 якоря, собираемой из листового железа. Магнитные полюсы и якорь охлаждают вентилятором. Лопастей вентилятора небалансирных машин закреплены на якоре, как показано штриховой линией. В балансирных машинах вентилятор, как правило, выносят за пределы статора и приводят от отдельного электродвигателя.

Якорь машины состоит из обмотки 6, выполняемой из медных изолированных проводников, укладываемых в пазы его железа 5 и коллектора 12, собранного из медных изолированных друг от друга и от вала 4 пластин. Подвод к якору и отвод от него тока осуществляют через щетки, закрепляемые в неподвижных держателях 11.

При торможении двигателя небалансирной электрической машины постоянного тока эффективную мощность его определяют по мощности, отдаваемой динамомашиной в виде электроэнергии, расход которой подсчитывают по показаниям электроприборов — амперметра и вольтметра или ваттметра. Мощность испытуемого двигателя (л. с.)

$$N_e = IU / (735 \eta_s),$$

где I — сила тока, А; U — напряжение тока на клеммах машины, В; η_s — к.п.д. машины.

Однако величина η , зависит от нагрузки и числа оборотов вала и изменяется со временем, что затрудняет непосредственное использование небалансирных машин постоянного тока для торможения двигателей. Поэтому применение их ограничивают в основном областью обкатки двигателей после сборки на заводах.

Для испытаний применяют исключительно балансирные машины, которые не требуют определения величины η .

При работе электрической балансирной машины в моторном режиме в результате взаимодействия магнитных полей якоря и статора на последнем возникает реактивный момент, который, будучи направлен в сторону, противоположную вращению якоря, стремится повернуть статор около оси якоря. Поэтому крутящий момент, затрачиваемый на прокручивание вала испытуемого двигателя, измеряют по реакции статора. При этом реактивные моменты от трения в подшипниках и от трения щеток о коллектор направлены в сторону вращения якоря, вследствие чего суммарная величина их $M_{тр}$, действуя на статор, автоматически уменьшает его реактивный момент M_c .

Таким образом, эффективный момент $M_{эф}$ на валу балансирной машины, а следовательно, и крутящий момент $M_{кр}$, необходимый для прокручивания вала испытуемого двигателя,

$$M_{кр} = M_{эф} = M_c - M_{тр}.$$

При работе балансирной машины в режиме генератора в обмотке якоря возникает электродвижущая сила, которая вызывает ток в цепи якоря. Ток своим магнитным полем противодействует вращению якоря, а следовательно, и вращению вала испытуемого двигателя.

Электрический эффективный момент противодействия якоря $M_{эф}$ полностью передается на статор в виде реактивного момента M_c , действующего в сторону направления вращения якоря, т. е. в сторону действия крутящего момента испытуемого двигателя. Суммарный реактивный момент трения $M_{тр}$ также направлен в сторону вращения якоря и стремится повернуть статор в этом направлении, вследствие чего складывается с M_c . Суммируя названные моменты, получим

$$M_{кр} = M_c + M_{тр}.$$

Так же, как и в гидравлических тормозах, динамометр электрического тормоза не учитывает момента от трения в подшипниках статора. Но поскольку данный момент весьма мал, то он не оказывает практического влияния на результаты измерений.

Регулирование балансирных машин постоянного тока путем применения одновременно и параллельного и последовательного возбуждения вызывается необходимостью получения большого пускового момента при работе в моторном режиме, когда прокручивают холодный, особенно не обкатанный двигатель. Последовательное возбуждение обеспечивает, как известно, больший крутящий момент, чем параллельное [4, 55].

Для включения машины на моторный или генераторный режимы по простейшей схеме, показанной на рис. IV.24, служит переключатель 1. При верхнем положении его машина работает в моторном

режиме, при нижнем — в генераторном (тормозном). Параллельную обмотку 8 возбуждения включают рубильником 11.

При работе в моторном режиме подвижные контакты потенциометра 12 и реостата 13 ставят в крайние правые положения, в результате чего все сопротивление реостатов оказывается выведенным из цепи параллельной обмотки. Подвижный контакт пуско-нагрузочного реостата 5 ставят в крайнее левое положение, чем обеспечивают

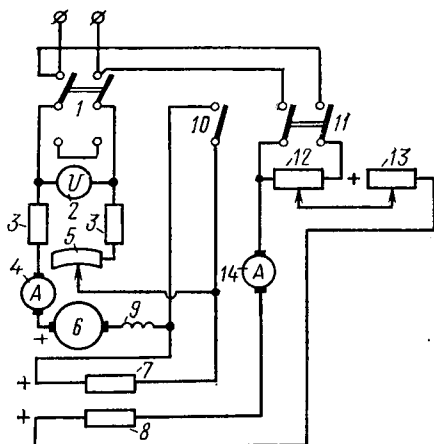


Рис. IV.24. Принципиальная схема управления электрической балансирной машиной постоянного тока

включение всего его сопротивления в цепь якоря. Затем включают рубильник 11, давая полное возбуждение машине, после чего включают в верхнее положение переключатель 1. В этом положении ток проходит от положительного полюса сети через левый нож переключателя 1, левый предохранитель 3, амперметр 4, якорь 6 машины, обмотку дополнительных полюсов 9, последовательную обмотку 7 и далее через подвижный контакт реостата 5, сопротивление этого реостата, правый предохранитель 3, правый нож переключателя 1 к отрицательному полюсу сети.

После того как якорь разовьет достаточное число оборотов, рукоятку пуско-нагрузочного реостата 5 передвигают вправо. Это повышает обороты якоря до нормального уровня при полном возбуждении. Дальнейшее их повышение на 10÷15% достигается путем передвижения скользящих контактов реостатов 12 и 13 влево, т. е. путем уменьшения силы тока возбуждения.

При переходе с моторного режима на генераторный необходимо включить подачу топлива и зажигание испытуемого двигателя и, как только последний вступит в работу, о чем будет свидетельствовать отсутствие тока в цепи якоря (стрелка амперметра 4 встанет на нуль), можно выключать переключатель 1, а затем передвинуть скользящие контакты реостатов 12 и 13 в крайнее левое положение. При этом сила тока в цепи возбуждения равна нулю (что покажет амперметр 14), возбуждение с машины будет снято, и вольтметр 2 покажет незначительную величину электродвижущей силы за счет остаточного магнетизма. Далее рукоятку пуско-нагрузочного реостата 5 передвигают в крайнее левое положение и включают рубильник 10, после чего переключатель 1 переводят в нижнее положение. Таким образом, балансирная машина будет включена по схеме генератора с нагрузкой на пуско-нагрузочный реостат 5.

Чтобы начать торможение испытуемого двигателя, скользящие контакты реостатов 12 и 13 постепенно передвигают вправо, увели-

чивая этим возбуждение машины. Одновременно следят за показаниями амперметра 4, стрелка которого должна отклоняться в сторону, противоположную ее отклонениям при работе на моторном режиме. Требуемую нагрузку можно установить также с помощью реостата 5, перемещая его рукоятку вправо, чем достигается уменьшение сопротивления в цепи якоря.

Назначение рубильника 10 состоит в том, чтобы накоротко замыкать последовательную обмотку 7 возбуждения при режиме торможения. Иначе магнитное поле этой обмотки будет действовать на параллельную обмотку 8 и размагничивать машину.

Таким образом, изменение нагрузки на режиме торможения можно обеспечить воздействием либо на цепь возбуждения, изменяя магнитный поток, либо на сопротивление в цепи якоря, изменяя силу тока.

Х а р а к т е р и с т и к а э л е к т р и ч е с к о г о т о р м о з а, т. е. зависимость поглощаемой им мощности от числа оборотов вала машины, определяется наибольшей силой тока в цепи якоря, которая может быть допущена нагревом обмотки якоря при полном возбуждении машины. Иными словами, нагрев электрической тормозной машины, как и в других типах тормозов, служит ограничением ее предельной мощности, поглощаемой на заданном скоростном режиме.

Очевидно, при сопротивлении нагрузочного реостата, равном R (Ом), сила тока (А) в якоря

$$I = U/R,$$

где U — напряжение тока в якоря, В.

А так как напряжение тока в якоря прямо пропорционально магнитному потоку статора и числу оборотов вала, то напряжение тока электрической машины с независимым возбуждением увеличивается пропорционально числу оборотов вала машины, т. е.

$$U = B_1 n,$$

где B_1 — постоянная, зависящая от конструкции машины и силы тока в цепи возбуждения; n — число оборотов вала машины.

Следовательно, мощность (л. с.), поглощаемая машиной постоянного тока при заданном числе оборотов вала,

$$N_e = IU / (735,5 \eta_g) = B_1^2 n^2 / (735,5 \eta_g R),$$

где η_g — к. п. д. генератора, зависящий от нагрузки и конструкции машины.

Если пренебречь зависимостью от нагрузки η_g и других величин, входящих в формулу, и ввести их в постоянную тормоза, то в общем случае теоретическая характеристика электрического тормоза с достаточной точностью может быть записана в виде

$$N_e \approx B n^2.$$

Таким образом, мощность, поглощаемая генератором постоянного тока, пропорциональна квадрату числа оборотов его вала, т. е. при увеличении числа оборотов возрастает по параболе и может быть

представлена семейством параболических кривых независимо от того, изменяется ли сопротивление R цепи якоря или величина магнитного потока полюсов статора, оказывающих влияние на постоянную величину B .

Каждому значению сопротивления в цепи якоря при неизменном магнитном потоке присущи определенные значения мощности, зависящие от числа оборотов вала (рис. IV.25). В рассматриваемом случае линия $0-1$ соответствует наибольшему, а линия $0-3$ — малому сопротивлению в цепи якоря.

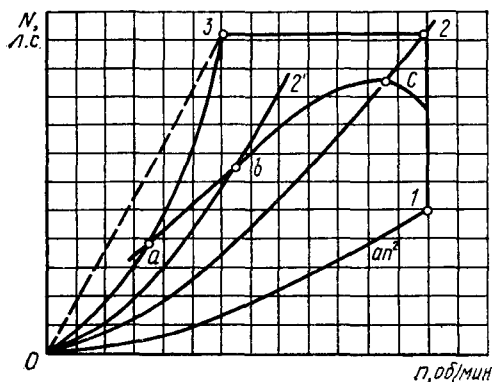


Рис. IV.25. Характеристика электрического тормоза

Контурная линия $0-3-2$ ограничивает те максимальные значения мощности, которые может поглощать генератор без перегрева в течение длительного времени. Соответственно и поле возможных режимов торможения, т. е. внешняя характеристика тормоза, ограничивается линиями $0-1-2-3-0$.

Если кривая abc мощности N_e испытуемого двигателя вписывается в этот контур, как показано на рисунке, то число оборотов, соответствующее, положим, точке b , в

которой пересекаются характеристики испытуемого двигателя и балансирной машины, будет вполне устойчиво при ее неизменном возбуждении и изменении мощности по линии $0-2'$. В случае возрастания числа оборотов вала двигателя тормозная мощность электрической машины резко увеличивается, и обороты вала двигателя снижаются до прежних. Наоборот, случайное снижение оборотов вала двигателя вызывает заметное падение мощности электрической машины, вследствие чего обороты двигателя вновь возрастают до прежнего значения.

Чтобы перейти на другой скоростной режим работы, необходимо изменить возбуждение машины. Например, уменьшить до уровня, при котором ее мощность изменяется по линии $0-3$, тогда устойчивое число оборотов переместится в точку a и т. д. Если необходимо увеличить мощность, снимаемую с испытуемого двигателя, следует увеличить магнитный поток и одновременно можно уменьшить сопротивление в цепи якоря так, чтобы мощность машины изменилась, например, по линии $0-2$. Тогда устойчивое число оборотов переместится в точку c пересечения кривых $0-2$ и мощности N_e .

Таким образом, изменяя сопротивление в цепи якоря и силу тока возбуждения машины, можно направленно изменять мощность, развиваемую балансирной машиной и, следовательно, устанавливать любое число оборотов вала испытуемого двигателя и величину отдаваемой им мощности, если это не выходит за пределы внешней харак-

теристики электрического тормоза и допускается конструкцией самого двигателя. Что касается действительных рабочих пределов электрических тормозов, то по внешней характеристике они ограничиваются: по линии 0—3 максимальной силой тока, допускаемой нагревом проводов при наибольшем крутящем моменте; по линии 3—2 максимальной мощностью, допускаемой условиями нагрева электрической машины (точка 3) и предельной угловой скоростью в связи с

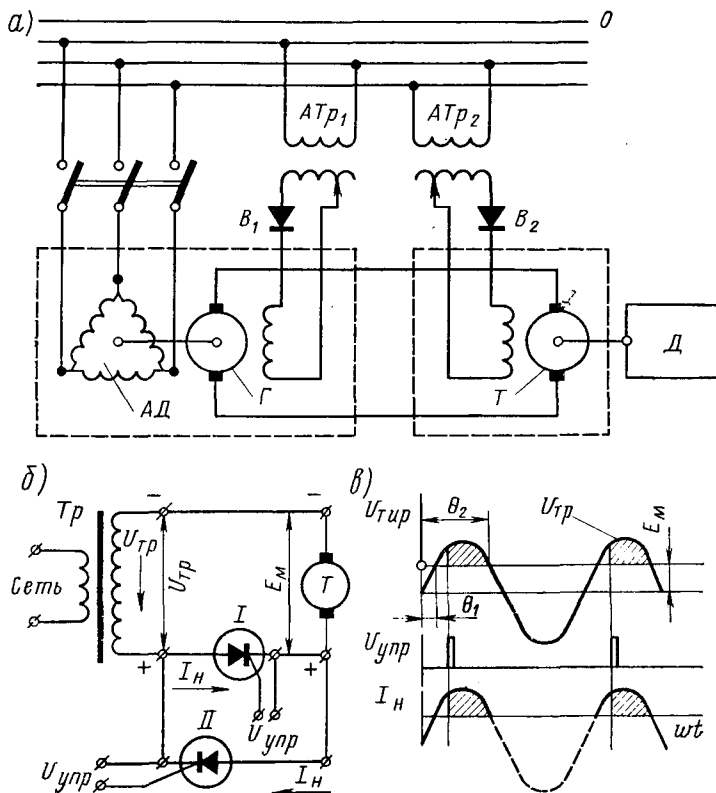


Рис. IV.26. Принципиальные схемы включения электрической балансирной машины постоянного тока в общую электрическую сеть, обеспечивающие рекуперацию энергии по способу электромашинного (а) и тиристорного (б) преобразования ее

прочностью якоря, нагружаемого центробежной силой (точка 2); по линии 2—1 максимальным напряжением, допускаемым электрической прочностью изоляции обмоток, и по линии 1—0 минимальной тормозной мощностью, поглощаемой машиной при отсутствии тока возбуждения.

Если в зоне малых сопротивлений в цепи якоря автоматически корректировать интенсивность магнитного потока, то за счет такой регулировки, широко применяемой в современных тормозах, на

участке 0—3 мощность, поглощаемую тормозом, можно изменять пропорционально увеличению числа оборотов якоря, как показано штриховой линией на рис. IV.25.

Включение в сеть и управление тормозными балансирными машинами постоянного тока по рассмотренной выше простейшей схеме (см. рис. IV.24) позволяет лишь понять основу их работы. Современные электрические тормозные установки представляют собой более сложные автоматизированные двух- и трехмашинные комплексы с самостоятельными агрегатами питания их постоянным током от мотор-генераторов или так называемых *умформеров*.

Принципиальная электрическая схема тормозной установки основана на известном принципе Леонардо, позволяющем использовать балансирную машину как в моторном, так и в генераторном режимах с рекуперацией энергии. Установка состоит из машины постоянного тока, соединенной посредством упругой муфты с асинхронным электродвигателем, который включают в общую трехфазную электрическую сеть лаборатории. Например, по схеме, показанной на рис. IV.26, основанной на двухмашинном варианте, содержащем две машины постоянного тока: тормоз *T* и генератор *G*. Машины связаны между собой электрической цепью, но имеют независимое возбуждение от двух автономных автотрансформаторов *АТр*, включаемых в общую трехфазную электрическую сеть лаборатории через полупроводниковые выпрямители *B*. Независимость возбуждения позволяет изменять силу тока возбуждения машин от самой малой до максимально допустимой, а это и необходимо для проворачивания, пуска, раскручивания, последующего нагружения испытуемого двигателя *D* и рекуперации его энергии.

Для прокручивания вала двигателя *D* включают в сеть асинхронный двигатель *АД*, который приводит в действие соединенный с ним генератор *G*, причем последнему сообщают очень малое возбуждение, а машине *T*, наоборот, — максимальное возбуждение. Далее плавно увеличивают возбуждение машины *G* до проворачивания вала машины *T* и соединенного с ним вала двигателя *D*. Последующее раскручивание вала двигателя *D* достигают соответствующим уменьшением возбуждения машины *T*, работающей в моторном режиме.

Переход машины *T* на режим торможения осуществляется автоматически без каких-либо дополнительных электрических переключений, путем лишь включения подачи в цилиндры топлива (в дизелях) или зажигания (в карбюраторных двигателях), вследствие чего вал испытуемого двигателя увеличивает число оборотов, и машина *T* переходит с моторного на генераторный режим, т. е. на режим торможения. Энергия, вырабатываемая машиной *T*, поступает в генератор *G*, который автоматически переходит на моторный режим и начинает вращать соединенный с ним ротор асинхронного двигателя *АД*.

На стадии, когда частота вращения ротора двигателя *АД* достигает синхронности с частотой изменения магнитного потока статора, ток в роторе становится равным нулю, вследствие чего до нуля уменьшается и момент на его валу. Поэтому дальнейшее незначительное увеличение частоты вращения ротора сверх синхронной переводит

двигатель АД в режим асинхронного генератора, и ток от него начинает поступать во внешнюю цепь, обеспечивая этим рекуперацию механической энергии, вырабатываемую испытуемым двигателем [58].

Еще большей сложностью и громоздкостью характеризуются трехмашинные системы современных электрических тормозов. Примером этого может служить рассматриваемый ниже тормозной динамометр постоянного тока японской фирмы «Мэйдэнся», в комплекс которого кроме балансирующей машины входят еще два генератора постоянного тока главного и вспомогательного умформеров.

В последнее время вместо электромашинного находит применение метод управления тормозными динамометрами путем включения их в сеть через тиристорные преобразователи. В этом случае отпадает необходимость в умформерах или в других машинных агрегатах с подвижными рабочими органами, компактность установки и ее бесшумность резко повышаются, полностью сохраняются и даже улучшается избирательная возможность настройки на заданный режим работы, включая эффективную рекуперацию энергии испытуемого двигателя.

Тиристорное управление основано на свойствах полупроводниковых управляемых германиевых диодов, называемых также управляемыми вентилями, или тиристорами. Схематично тиристоры изображают, как показано на рис. IV. 26, б, в виде треугольничка с черточкой у одной из его вершин, заключенных в окружность. Треугольничек означает катод, а черточка — анод. Когда анод имеет положительный потенциал относительно катода, тиристор пропускает ток в сторону анода. Следовательно, треугольничек можно рассматривать как острие стрелки, показывающей направление возможного тока в цепи. Тиристорам, как и обычным диодам, свойственны отсутствие накала катода и малое падение напряжения при прохождении тока. Они обладают также униполярностью, т. е. односторонней проводимостью, но только при наличии напряжения на их управляющем электроде. Иначе тиристоры вообще «заперты» для прохождения тока. Путем периодической, т. е. импульсной, подачи напряжения $U_{упр}$ на управляемый электрод тиристора его переводят в состояние «открыт», а снятием с него анодного напряжения вновь запирают. Изменяя нужным образом момент подачи (фазу) управляющего импульса, обеспечивают требуемую силу тока в цепи.

Тиристорам присущи большие значения рабочих токов и обратных напряжений, составляющих сотни вольт, поэтому они пригодны для управления мощностями до 150 кВт и более.

Схема тиристорного управления тормозным динамометром, показанная на рис. IV. 26, б, состоит из электрической машины постоянного тока — тормоза T и трансформатора Tr , связанных между собой электрической цепью через тиристоры I и II , включенные так, что первый из них пропускает ток только в сторону электрической машины, второй — в сторону трансформатора.

Поскольку сила тока в цепи якоря электромашины в целом зависит от напряжения $U_{тир}$ и активного сопротивления R цепи, то в случае подачи импульса напряжения $U_{упр}$ на управляющий электрод

тиристора I ток в цепи определяется разностью встречных напряжений трансформатора $U_{тр}$ и электрической машины E_m :

$$I_n = U_{тир}/R = (U_{тр} - E_m)/R.$$

Диаграммы напряжений и токов, приведенные на рис. IV. 26, в, показывают, что подача импульсов напряжения на управляющий электрод тиристора I во время положительного полупериода в интервал времени, соответствующий угловому интервалу $\theta_1 - \theta_2$, открывает

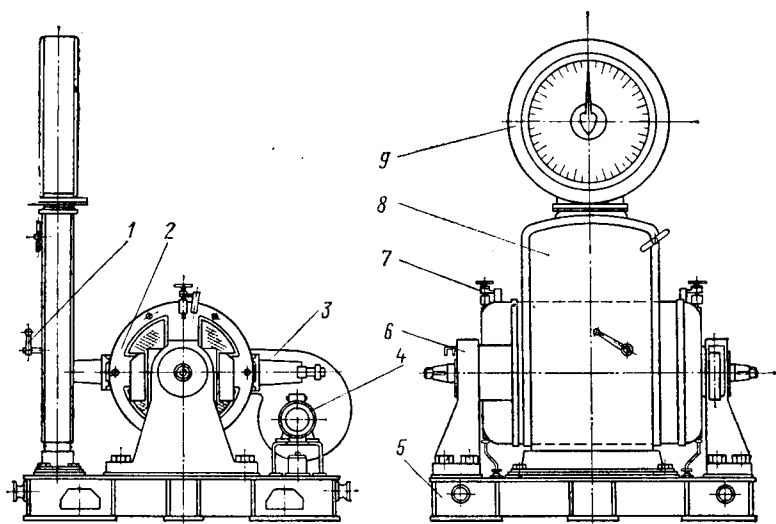


Рис. IV. 27. Электрический тормозной динамометр «Мейдэнся»:

1 — рычаг блокировочного устройства (арретир); 2 — балансирующая электрическая машина постоянного тока; 3 — вентилятор; 4 — электрический двигатель привода вентилятора; 5 — рама; 6 — опоры балансирующей машины; 7 — масляная каплеуловитель; 8 — корпус механизма весового устройства; 9 — весовая головка

тиристор. А так как направление тока в цепи совпадает при этом с напряжением трансформатора, то выпрямленный ток из общей сети поступает в электрическую машину T . В результате она начнет работать в моторном режиме, т. е. будет проворачивать и раскручивать вал испытуемого двигателя.

Чтобы перевести электромашину в режим торможения после пуска двигателя, достаточно переключить подачу импульсов напряжения на управляющий электрод тиристора II , вследствие чего ток изменит направление в сторону трансформатора, т. е. навстречу $U_{тр}$. Очевидно, в момент, когда $E_m > U_{тр}$ и через тиристор потечет ток

$$I_{II} = (E_m - U_{тр})/R,$$

он будет поступать в общую сеть. Для сглаживания пульсации тока применяют групповые многофазные тиристорные преобразователи.

Кроме отсутствия подвижных (вращающихся) элементов и высокой компактности тиристорному управлению свойственны бесшумность работы, малые затраты энергии на управление и высокие

эксплуатационные качества: стабильность скоростных и нагрузочных режимов работы, легкость имитации неустановившихся режимов, долговечность и т. д.

Электрическая тормозная установка «Мэйдэнся» с балансирной машиной постоянного тока мощностью 75 кВт, общий вид которой показан на рис. IV. 27, является типичным примером трехмашинной системы электрического тормоза. В ее состав кроме балансирной машины входят: главный умформер, вырабатывающий постоянный ток для питания балансирной машины при работе в моторном режиме и обеспечивающий рекуперацию энергии испытуемого теплового двигателя; вспомогательный умформер — источник постоянного тока, необходимого для возбуждения балансирной машины и машины главного умформера; панели-шкафы управления главным умформером, переключателями и реле защиты автоматических устройств; пульт управления установкой.

В режиме генератора балансирная машина развивает 75 кВт при 3000 об/мин и соответствующий этому крутящий момент, равный 24,5 кгс·м; при максимальных оборотах 7000 об/мин крутящий момент снижается до 10,5 кгс·м. В моторном режиме мощность и крутящий момент составляют 55 кВт и 18 кгс·м при 3000 об/мин; при 7000 об/мин крутящий момент снижается до 7,5 кгс·м. В диапазоне 0–3000 об/мин мощность балансирной машины изменяется прямо пропорционально числу оборотов вала машины.

Регулирование режима работы балансирной машины обеспечивается с помощью автоматов, поддерживающих либо заданную скорость вращения вала машины, либо силу тока в цепи якоря по выбору испытателя.

Заданную скорость независимо от колебаний нагрузки устанавливают путем сопоставления напряжения, возникающего в цепи якоря, с напряжением, задаваемым регулятором, основываясь на пропорциональном изменении напряжения в цепи якоря от числа оборотов $U=f(n)$. Обнаруженную разницу в напряжении усиливают и используют для регулирования тока возбуждения машины. Автоматическое выравнивание заданной скорости облегчает снятие многих характеристик двигателя.

Постоянную величину тока в цепи якоря на всех скоростных режимах устанавливают также путем сопоставления рабочего напряжения с напряжением сигналов от регулятора тока с последующим усилением обнаруженной разницы и подачей в цепь возбуждения балансирной машины. Когда ток ее превышает установленную величину, ток возбуждения уменьшается, соответственно снижается нагрузка, и наоборот. Стабилизатор тока удобен при исследовании разгона и для других целей.

Контроль за работой установки ведут с помощью тахометра, вольтметра и амперметра. Скорость, напряжение и силу тока регулируют в пределах, отмеченных красной чертой на каждом из указанных приборов.

Кроме электрических устройств, обеспечивающих включение и эксплуатацию тормозного динамометра «Мэйдэнся», в систему его

управления введена аварийная цепь с двумя вспомогательными реле. Последние, по получении аварийного сигнала, автоматически переводят балансирную машину на регулирование ее по способу постоянной скорости, которая снижается до нуля. Достигается это уменьшением сопротивления в цепи машины до такого уровня, что испытываемый двигатель перегружается и резко останавливается.

Установка снабжена также аварийным выключателем, который автоматически останавливает испытываемый двигатель в случаях внезапного снятия нагрузки. С этой целью в цепь низкого напряжения системы зажигания двигателя вмонтировано реле, размыкающее цепь зажигания, если обороты вала превышают допускаемые*. Датчиком для указанного реле служит тахогенератор, стрелка которого входит в соприкосновение с рычагом, и замыкает цепь реле.

Электродвигатели вспомогательных устройств, а именно: насоса системы смазки, вентилятора, охлаждающего обмотки балансирной машины, и умформера возбуждения — заблокированы так, что остановка любого из них приводит к разъединению силовой цепи балансирной машины. О неисправности этих агрегатов сигнализирует оранжевая контрольная лампа на пульте управления. Во избежание перегрева тормозного динамометра при остановке вентилятора обдува предусмотрено автоматическое отключение тока возбуждения. В случае перегрева главного умформера срабатывает термореле и разъединяет силовую цепь между умформером и балансирной машиной, вспомогательные агрегаты установки при этом не отключаются и продолжают работать.

Органы управления тормозом «Мэйдэнса» выполнены на полупроводниках, поэтому имеют сравнительно малые габариты, небольшой вес, высокую точность действия и малую энергоемкость. Весовая головка проградуирована и в кгс и в кгс·м, а постоянная тормоза, т. е. величина $k=0,001$.

§ IV.6. Индукторные тормоза

Тормоза этого типа являются разновидностью электрических и известны также под названием *индукционных*, или *электромагнитных* [10]. Мощности испытываемого двигателя расходуется в них на образование вихревых токов, возникающих в магнитопроводе в случае периодического намагничивания его и размагничивания. Если вращать монолитный железный диск между двумя полюсами магнита, то в диске возникнут вихревые токи, образующие магнитное поле, которое взаимодействует с полем магнита и создает тормозной момент, так же как в любой электрической машине. Если вместо железного диска использовать ротор с обмоткой (электромагнит), появляется возможность регулировать этот тормозной момент в широких пределах.

* Как правило, дизели имеют регуляторы оборотов вала, связанные с топливopодачей, поэтому дополнительная защита для них не требуется.

Поскольку вихревые токи нагревают тормоз пропорционально поглощаемой мощности испытуемого двигателя, возникает необходимость в отводе тепла по аналогии с тормозами других типов, в частности, гидравлическими. Чтобы облегчить эту задачу, ротор делают магнитным (тогда его называют индуктором), а статор — электромагнитным и охлаждают их водой. В особо быстроходных конструкциях индуктор охлаждают воздухом.

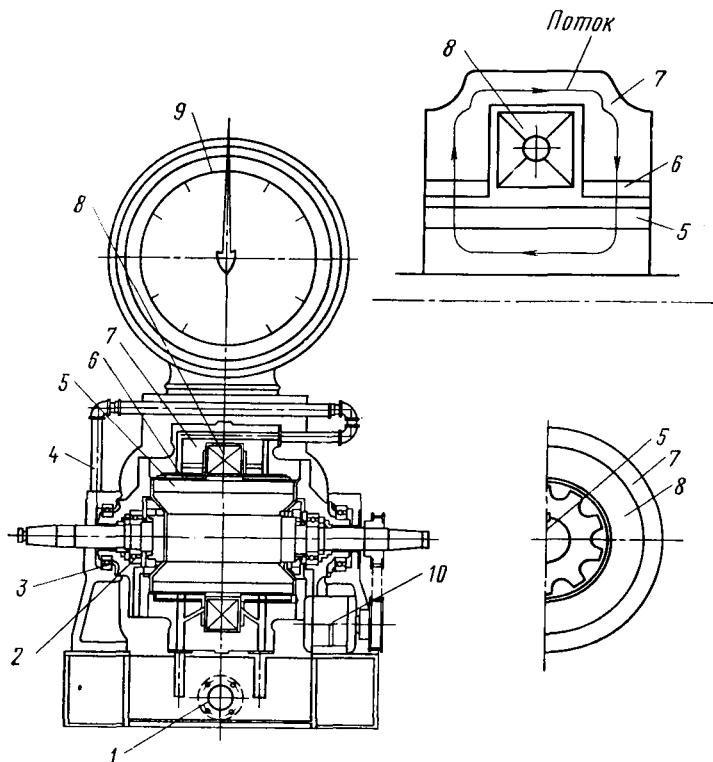


Рис. IV.28. Индукторная балансирная машина

Для размещения катушки возбуждения в яме статора делают глубокий кольцевой паз, а ротор выполняют с продольными пазами, вследствие чего он приобретает зубчатую форму, как, например, в тормозе фирмы «Мэйдэнс» (рис. IV.28). Статор этого тормоза состоит из яма 7, имеющего хорошую магнитную проницаемость, вмонтированной в него кольцевой катушки возбуждения 8 и кольцевой вставки 6, обладающей высокими магнито- и электропроводностью. Статор установлен на шариковых подшипниках 3, благодаря чему может совершать качательные движения около оси вала ротора.

При прохождении тока по обмотке катушки возбуждения возникает магнитный поток, который, преодолевая зазор между вставкой 6 и зубцами ротора 5, образует замкнутый контур, как показано на ри-

сунке. Вследствие этого вращение ротора вызывает поочередное намагничивание отдельных зон вставки 6, приводящее к возникновению в ней вихревых токов. Последние и образуют магнитное поле, взаимодействующее с основным магнитным полем.

В рассматриваемой конструкции тормоза охлаждающую воду подводят по трубе 4 в зону над ярмом. Вода охлаждает статор, омывает попутно индуктор (ротор) и сливается снизу через отверстие 1 под ярмом. Все детали, омываемые водой, имеют антикоррозионное покрытие, подшипники 2 вала ротора надежно защищены сальниками, а катушка возбуждения выполнена водонепроницаемой. Чтобы исключить помехи угловым перемещениям статора, воду в него подают через гибкий резиновый шланг под напором $0,4 \div 0,6$ кгс/см² ($\approx 0,04 \div 0,06$ МН/м²). Поэтому тормоз можно подключать непосредственно к общей водопроводной сети, не прибегая к подкачивающим насосам или напорным бакам. В этом состоит одно из преимуществ индукторных тормозов.

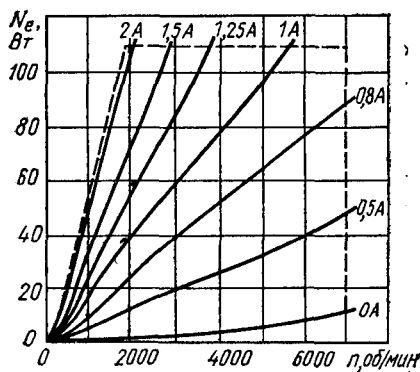


Рис. IV. 29. Характеристика индукторного тормоза

Характеристика индукторного тормоза показана на рис. IV. 29.

Особенности протекания ее определяются тем, что развиваемый тормозом момент при заданном постоянном токе возбуждения вначале резко возрастает, а далее с увеличением числа оборотов остается постоянным, как показано на рисунке. При такой закономерности протекания мощности тормозной момент в зоне рабочих чисел оборотов вала остается постоянным. Поэтому устойчивого торможения можно достигнуть только путем регулирования скорости, поддерживая ее на заданном уровне с помощью автоматических устройств, что не составляет какой-либо трудности.

Регулирование индукторных тормозов может быть осуществлено тремя способами: выбором тока возбуждения, поддержанием постоянной скорости вращения вала и регулированием тока возбуждения по мере увеличения скорости вращения вала. При любом способе расход энергии на управление ничтожен и не превышает 0,5% от поглощаемой мощности.

Индукторные тормоза могут работать с любым из рассмотренных выше динамометров. Чаще всего они имеют динамометры с весовой головкой 9 (рис. IV.28). Настройку тормоза на заданный скоростной режим испытаний осуществляют с помощью тахогенератора 10, приводимого от вала ротора гибкой связью.

Индукторные тормоза отличаются компактностью и простотой конструкции, долговечны, легко управляемы на расстоянии и просты в обслуживании. Тормозная мощность их достигает иногда 3000 кВт, а скорость вращения ротора может быть рассчитана на $10 \div 15$ тыс.

об/мин. Тормоза этого типа целесообразно применять при длительных испытаниях двигателей по заранее спланированной программе с автоматическим контролем заданных режимов работы, включая неустановившиеся.

§ IV.7. Условия совместной устойчивой работы двигателя и тормоза

Устойчивость торможения характеризуется свойствами тормоза сохранять заданную скорость при неизменном положении регулирующих органов тормоза и двигателя и быстро восстанавливать ее в случаях кратковременных нарушений равновесия между крутящим и тормозным моментами.

Устойчивость тормозов, как отмечалось ранее, предопределяется особенностями характеристики тормоза, которую в общем случае можно представить в виде степенной зависимости

$$N_e = an^m.$$

Если, положим, мощность двигателя по какой-либо причине несколько возросла, как показано, например, штриховой линией на рис. IV.30, то повысится и число оборотов n на определенную величину Δn , зависящую от показателя m . Очевидно, большему значению m соответствует меньшая величина Δn . Памята, что механические и индукторные тормоза имеют показатель $m=1$, электрические — $m \approx 2$ и гидравлические — $m \approx 3$, нетрудно заключить, что наибольшей устойчивостью обладают гидравлические тормоза.

Действительно, если на график (рис. IV. 30) нанести характеристики указанных тормозов, принимая за исходные одну и ту же мощность при оборотах вала n_1 , то оказывается, что большую величину Δn имеют механический (Δn_m) и индукторный тормоза, а меньшую — гидравлический (Δn_g). Электрические тормоза обладают меньшей устойчивостью, чем гидравлические ($\Delta n_e < \Delta n_g$).

Однако приведенные закономерности характерны для условий большой загрузки тормозов при работе испытуемых двигателей на режимах полной или близкой к этому нагрузках. С такими нагрузками автомобильные и тракторные двигатели проходят испытания лишь на безотказность (надежность). В большинстве других испытаний эти режимы используют сравнительно короткое время. Поэтому важно, чтобы тормоз сохранял присущую ему устойчивость на частичных нагрузках. А это определяется не только его принципиальными, но и конструктивными особенностями.

Так, дисковые и штифтовые гидравлические тормоза при работе на малых нагрузках и с относительно небольшим числом оборотов

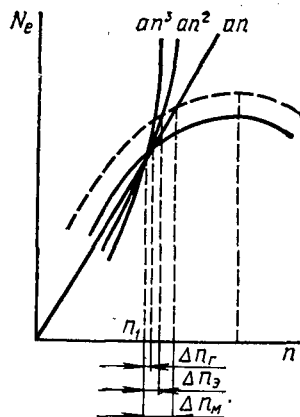


Рис. IV.30. Условия совместной устойчивой работы двигателя и тормоза

вала далеко не удовлетворяют нужным требованиям. Вследствие небольшой радиальной толщины водяного кольца и трудностей, связанных с формированием правильной его геометрии, указанные гидравлические тормоза при частичном заполнении работают неустойчиво и в этих условиях значительно уступают электрическим.

Кроме устойчивости, для успешной эксплуатации тормозов большое практическое значение имеет стабильность торможения, т. е. свойство тормоза достаточно долго поддерживать установленный тормозной момент. С этой точки зрения предпочтительнее также тормоза постоянного тока. Стабильность их гораздо выше дисковых и штифтовых гидравлических тормозов. На второе место можно поставить лопастные гидравлические тормоза, ротор которых полностью омывается водой на всех нагрузочных режимах.

В целом электрические тормоза постоянного тока обеспечивают более приемлемые условия для совместной с двигателем устойчивой и стабильной работы испытательных установок. Тем более, управление современных электрических тормозов, как правило, автоматизируют, что позволяет в любом случае поддерживать заданный скоростной режим. Автоматизация управления вообще сглаживает недостатки тормозов, но такое, весьма удобное регулирование по скорости применяют пока в электрических тормозных устройствах. Это обстоятельство следует учитывать при выборе типа тормоза.

ГЛАВА V

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ И ВРЕМЕНИ

§ V.1. Общие сведения

Стендовые испытания двигателей предполагают согласованные измерения скорости вращения вала и времени. Обе эти величины необходимо фиксировать одновременно и тщательно с точностью, допускаемой приборами, выбранными для проведения испытаний. Не располагая надежными экспериментальными данными, оценивающими указанные исходные величины в отдельных замерах, нельзя определить, например, мощностные и экономические показатели испытуемого двигателя на заданном режиме. Нельзя даже настроить испытательную установку на определенный режим, если нет соответствующих приборов контроля мгновенной скорости вращения вала или измерения суммарного числа его оборотов за точно фиксируемый отрезок времени.

Угловая скорость, или частота вращения объекта, выраженная через угловое перемещение φ и время t , в общем случае связаны между собой зависимостью $\omega = d\varphi/dt$. Очевидно, при равномерном вращательном движении угловая скорость $\omega = \varphi/t$.

По новой международной системе единиц СИ скорость вращения деталей машин должна измеряться только в радианах. Однако приборов, проградуированных в радианах, пока нет, поэтому скорость вращения валов продолжают измерять в единицах полного оборота за время 1 мин, т. е. в n об/мин. Целесообразно оценивать ее также частотой вращения в 1/с.

Угловая скорость (1/с) вращательного движения объекта по числу его оборотов в минуту

$$\omega = \pi n / 30.$$

А так как между угловой ω и линейной v (м/с) скоростью точки, расположенной на расстоянии r от оси вращения, существует зависимость $v = r\omega$, то

$$v = \pi r n / 30.$$

В практике испытаний линейную скорость часто определяют через угловую скорость вращения, прибегая к измерению числа оборотов соответствующего вала.

Обороты вала, или частоту его вращения, измеряют приборами двух типов: тахометрами, показывающими непосредственно число оборотов в минуту, и суммарными счетчиками, фиксирующими число оборотов за определенный отрезок времени. Кроме этих базовых приборов, применяют тахографы и тахоскопы, в которых механизмы определения скорости вращения и времени кинематически связаны и представляют собой единое измерительное устройство.

Время измеряют механическими и электрическими секундомерами. Особенно распространены теперь различные электронные частотомеры, обладающие широкой универсальностью. Однотипные частотомеры позволяют иногда измерять мгновенные и суммарные числа оборотов вала, продолжительность одного измерения и интервалы времени между отдельными сигналами датчиков, а также служат датчиками времени для других приборов и т. д.

§ V.2. Тахометры, тахоскопы и тахографы

Тахометры относятся к аналоговым дифференцирующим механизмам. По принципу их действия различают: центробежные, электрические, магнитные, электронные, или импульсные, стробоскопические, электронно-стробоскопические, хронометрические (часовые), пневматические, гидравлические, фрикционные, вибрационные и др. В лабораториях автомобильных и тракторных двигателей применяют только некоторые из перечисленных тахометров, причем выполняют их в двух вариантах: приставными (ручными) и стационарными. Последними обязательно снабжают все современные тормозные устройства, но это не исключает применения ручных приборов, к которым иногда прибегают.

Тахометры, как и другие измерительные приборы, состоят из трех звеньев: датчика (приемника), передающего звена и указателя (чаще всего стрелочного).

Шкалу указателя тахометров градуируют в числах оборотов вала в минуту с равномерными, т. е. пропорциональными, и, в крайнем случае, с неравномерными делениями. Начальная отметка шкалы указателя соответствует наименьшему измеряемому значению скорости, а конечная — наибольшему. Разность между этими значениями и определяет диапазон измерения.

Стационарные тахометры при необходимости присоединяют к валу двигателя или валу тормозного динамометра с помощью зубчатых передач, эластичных муфт, гибких валиков (тросов), ременных и цепных передач. Ручные тахометры присоединяют непосредственно к торцу или цилиндрической поверхности носка вала испытуемой машины. С этой целью на валик тахометра надевают специальные стальные трехгранные или резиновые конусные наконечники и диски, которые увлекают его во вращение трением.

Центробежные тахометры до недавнего времени относились к наиболее распространенным. Они отличаются прочностью, просты в эксплуатации, но не обладают нужной точностью и недостаточно стабильны в работе.

Действие центробежных тахометров основано на использовании центробежной силы грузов, шарнирно соединяемых с приводным валом, или массивного кольца, закрепляемого под углом к оси вращения и имеющего массу m . Величина центробежной силы

$$P_c = mr\omega^2,$$

где r — расстояние от центра тяжести массы до оси ее вращения;
 ω — угловая скорость вращения.

Так как центробежная сила грузов находится в квадратичной зависимости от угловой скорости вращения, то вследствие этого и линейности характеристики измерительной пружины шкала указателя прибора получается неравномерной [46, 68].

На рис. V.1 приведена схема центробежного тахометра с грузовым кольцом 3, которое своей осью 2 шарнирно закреплено на валу 1, а тягой 6 шарнирно соединено с муфтой 5, имеющей возможность перемещаться по валу 1. Вокруг оси 2, несущей грузовое кольцо, навита измерительная спиральная пружина 4, уравнивающая момент от центробежной силы инерции грузового кольца, возникающего вследствие вращения вала. Величина этого момента

$$M_k = (m/4)[R^2 + r^2 - (1/3)h^2](\pi n/30)^2 \sin 2\varphi,$$

где m — масса кольца, кг; R и r — наружный и внутренний радиусы кольца, см; h — высота кольца, см; n — число оборотов вала тахометра, мин; φ — угол между осями кольца и вала, град.

Шкалу указателя центробежных тахометров обычно градуируют по образцовым тахометрам и выбирают ее так, чтобы отношение верхнего предела шкалы к нижнему составляло примерно 4 и не превышало 6. Малая кратность шкалы приближает ее к равномерной.

Погрешности центробежных тахометров составляют 1÷8%, причем большие из этих значений соответствуют режимам работы с относительно малыми числами оборотов вала. Источниками погрешностей служат: нестабильность характеристики уравнивающей пружины; трение в сочленениях механизма прибора; влияние температуры окружающей среды в связи с изменением вязкости смазки и размеров передающих деталей механизма и т. д.

Привод стационарных центробежных тахометров осуществляют гибким валиком, состоящим из сердечника, — тонкой стальной

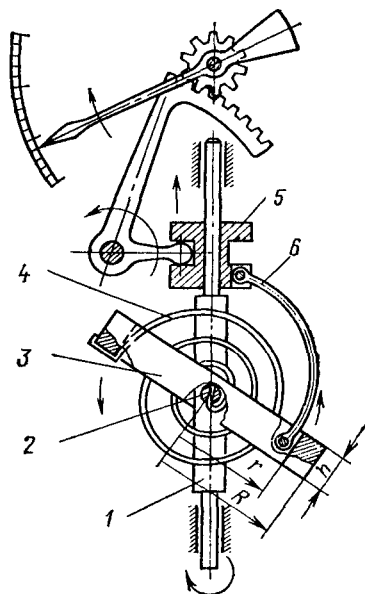


Рис. V.1. Центробежный тахометр

проволоки диаметром 0,5 мм и навитой на нее в несколько слоев герметически обработанной проволоки, толщина которой увеличивается к внешнему слою. Направление вращения валика (троса) определяется направлением витков верхнего слоя навивки, при работе закручивающейся и стягивающей внутренние слои. Оболочку, внутри которой вращается гибкий валик, изготовляют длиной до 2,5 м и укладывают без резких изгибов. Иначе возможны скручивание троса

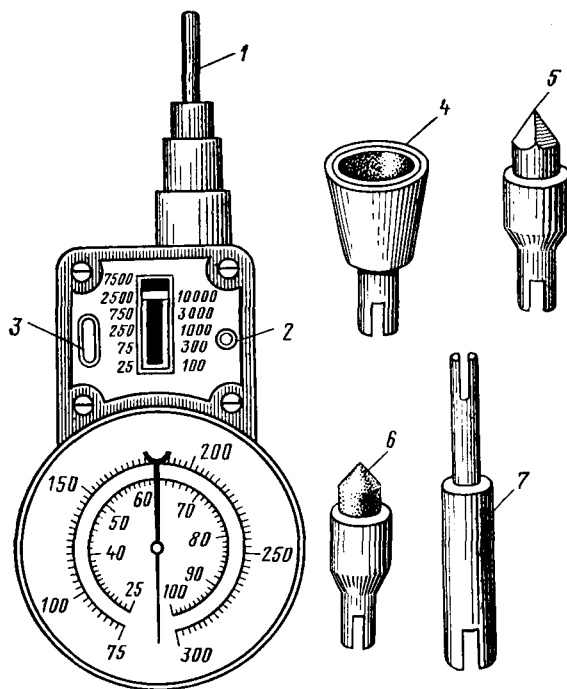


Рис. V.2. Общий вид центробежного приставного тахометра с соединительными наконечниками

и неизбежные резкие колебания стрелки указателя, что вызывает значительные погрешности в определении скорости вращения вала испытуемой машины.

Для расширения диапазона и повышения точности измерения в конструкцию центробежных тахометров (обычно приставного типа) встраивают шестеренчатые коробки передач с ручным переключением на нужный диапазон скоростей вращения.

Типичная конструкция приставного тахометра показана на рис. V.2. Благодаря наличию коробки передач он позволяет измерять скорости в диапазоне $25 \div 30\,000$ об/мин с интервалами, указанными на крышке его корпуса.

Для выбора нужного интервала необходимо, удерживая валик 1, нажать на кнопку 2 и передвиганием валика установить указатель шкалы коробки передач против требуемого интервала чисел оборо-

тов. Циферблат тахометра имеет две шкалы: внутреннюю, по которой отсчитывают обороты в интервалах $25 \div 100$, $250 \div 1000$, $2500 \div 10\,000$, и наружную для интервалов $75 \div 300$, $750 \div 3000$ и $7500 \div 30\,000$ об/мин. При измерении небольших чисел оборотов вала (до 300) применяют трехгранный стальной наконечник 5, а на режимах более высоких скоростей — резиновый наконечник 6. Плоским резиновым наконечником 4 пользуются в случаях, когда вал объекта испытаний не имеет центровочного отверстия. При необходимости на валик 1 тахометра надевается удлинитель 7.

Наконечник прижимают к валу так, чтобы не было пробуксовывания, а корпус тахометра удерживают в строго горизонтальном положении по уровню 3. Продолжительность подключения тахометра не должна превышать 20—30 с.

Электрические тахометры совершеннее центробежных, поэтому находят более широкое применение. Устройство электрических тахометров состоит в следующем: к валу испытуемой машины присоединяют датчик, представляющий собой динамомашину постоянного или переменного тока, а возникающее при работе напряжение тока измеряют с помощью вольтметра или частотомера, шкала которых проградуирована непосредственно в числах оборотов вала.

Электрические тахометры обладают достаточно высокой точностью, допускают нужную в практике дистанционность измерений и позволяют подключать к датчику ряд указателей. Однако с течением времени чувствительность их несколько изменяется. К тому же показания тахометров постоянного тока сильно зависят от колебаний температуры. Так, например, погрешность исправного прибора может возрасти на 0,5% при изменении температуры всего на 1°C , если в его конструкции не предусмотрены компенсирующие устройства [46].

Электрический тахометр постоянного тока показан на рис. V.3. Динамомашина выполнена с постоянными магнитами 1, ее якорь 5 соединен с валом испытуемого двигателя. При вращении якоря его обмотка пересекает силовые линии магнитного поля, создаваемого полюсами постоянных магнитов, вследствие чего в ней индуцируется э. д. с. Так как в каждом проводнике обмотки якоря индуцируется э. д. с., переменная по направлению, то якорь снабжен коллектором, благодаря которому щетки снимают напряжение одной полярности.

Электрический ток от полюсовой щетки коллектора по проводу поступает в обмотку 3 подвижной системы вольтметра 4, откуда воз-

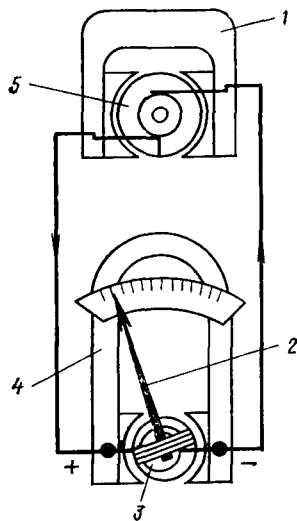


Рис. V.3. Принципиальная схема электрического тахометра постоянного тока

вращается к минусу динамомашины через щетку и коллектор в обмотку якоря. Напряжение U такой динамомашины изменяется, как известно, пропорционально числу оборотов якоря и магнитному потоку Φ :

$$U = c\Phi n,$$

где c — постоянная величина, зависящая от конструктивных особенностей динамомашин; n — число оборотов, показываемое стрелкой 2.

В условиях тщательного ухода, соблюдения режима и повторных тарировок тахометры постоянного тока обеспечивают точность $\pm 1\%$. При недостаточном уходе износ щеток и загрязнение коллектора дат-

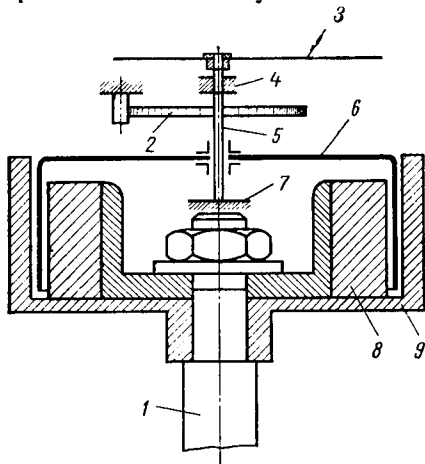


Рис. V.4. Магнитный, или индукционный, тахометр

чика (динамомашин) изменяют переходное сопротивление электрической цепи и заметно увеличивают погрешности измерений. Однако в электрических испытательных установках с автоматическим регулированием заданного скоростного режима применение тахометров постоянного тока (тахогенераторов) необходимо, поскольку управляющее напряжение должно быть строго пропорционально числу оборотов вала двигателя.

Электрические тахометры переменного тока отличаются тем, что датчик их представляет собой одно- или двухфазный генера-

тор с неподвижными обмотками, с которых снимают переменный ток. Подвижной частью этих тахометров служит двухполюсная или многополюсная магнитная система. В качестве указателей применяют электродинамические (ферродинамические), электромагнитные и другие вольтметры или измерители частоты переменного тока — резонансные частотомеры.

Ротор мотор-генератора переменного тока присоединяют к валу испытуемого двигателя, вследствие чего угловая скорость его пропорциональна измеряемой. Вращаясь вместе с ротором, полюсы постоянного магнита образуют вращающееся магнитное поле, постоянное по величине и переменное по направлению. А так как магнитное поле пересекает проводники обмотки статора, в последней индуцируется э. д. с. и, следовательно, создается переменный электрический ток. Как и в тахометрах постоянного тока, напряжение тока, вырабатываемого мотор-генератором, пропорционально частоте вращения якоря. Ток от мотор-генератора по двум фазовым проводам подводится в обмотки электромагнитов вольтметра, а по уравнительному проводу возвращается от вольтметра к генератору.

Общие и температурные погрешности тахометров переменного

тока имеют тот же порядок, что и в тахометрах постоянного тока. Однако в них исключен основной недостаток последних, связанный с наличием коллектора и щеток.

Магнитные, или индукционные, тахометры основаны на действии вращающегося магнитного поля на размещаемый в нем немагнитный цилиндр.

Принципиальная схема устройства такого тахометра показана на рис. V.4. На валу 1, подключаемом к валу двигателя, закреплен постоянный магнит 8, концентрично с которым на своей оси 5 расположен легкий цилиндр 6 из красной меди или из алюминия. Ось цилиндрика вращается на подшипниках 4 и 7, из которых первый вмонтирован в торец вала 1, а второй расположен в мостике, связанном с корпусом 9 прибора. Ось 5 несет стрелку 3 указателя и в исходном положении фиксируется измерительной пружиной 2, второй конец которой закрепляется к неподвижному мостику.

При вращении магнит 8 создает вращающееся магнитное поле, силовые линии которого пересекают цилиндр и как в проводнике электрического тока возбуждают в нем вихревые токи. Создаваемое этими токами магнитное поле взаимодействует с магнитным полем магнита 8 и возникающий при этом момент отклоняет цилиндр 6 на некоторый угол, пропорциональный силе, с которой полюсы постоянного магнита притягивают цилиндр.

Если Φ — магнитный поток; a и b — поперечные размеры полюса магнита; c — толщина стенок цилиндрика; ρ — удельное электрическое сопротивление материала цилиндрика; n — скорость вращения вала тахометра; ω — угловая скорость вращения постоянного магнита, закрепленного на валу, и r — расстояние от центра вращения до центра полюса постоянного магнита, то момент вращения

$$M_{\text{вр}} = \Phi^2 r^2 c \omega / (ab\rho \cdot 10^5) = [\Phi^2 r^2 c \pi / (ab\rho 3 \cdot 10^6)] n = kn.$$

Следовательно, момент, вызывающий поворот цилиндрика 6 и стрелки 3 указателя, прямо пропорционален n , т. е. числу оборотов вала тахометра. Поэтому шкала указателя магнитных тахометров равномерная, что составляет их преимущество.

Величина углового перемещения стрелки 3 определяется действием двух моментов: момента $M_{\text{вр}}$ и уравновешивающего его крутящего момента спиральной пружины 2, нагружающей ось 5 стрелки указателя. Погрешности магнитных тахометров не превышают $1 \div 2\%$. Кроме равномерности шкалы, они отличаются также простотой конструкции.

Недостатки магнитных тахометров заключаются в чувствительности к температурным изменениям и в некотором ослаблении напряженности магнитного поля постоянного магнита с течением времени [10, 31].

Рассмотренные центробежные, электрические и магнитные тахометры имеют сравнительно большие габариты и должны присоединяться непосредственно к валу испытуемой машины. Это дополнительно нагружает ее, создает иногда затруднения в работе и несколько увеличивает погрешности измерения. Поэтому, наряду с пере-

численными тахометрами, в практике лабораторий двигателей широко используют измерительные устройства, для которых не требуется механическая связь с валом испытательной установки. К таким измерителям относятся, в частности, стробоскопические приборы.

Стробоскопические тахометры основаны на том, что зрительное ощущение не исчезает мгновенно. При средней освещенности предметов длительность зрительного последствия составляет, как известно, $1/15$ — $1/20$ с. Если зрительные раздражения следуют друг за другом с перерывами менее указанных, то ощущения от предмета не успевают исчезать из нашего сознания, независимо от того, находится ли он в состоянии движения или покоя. При этом, когда все импульсы в строгой последовательности поступают в глаз, он воспринимает действительное состояние рассматриваемого предмета. А в случаях, когда попадает лишь часть световых импульсов, то, в зависимости от их частоты и характера согласования со скоростью движения предмета, глаз может воспринимать движение предмета не только в действительном, но и в искаженном виде.

В результате искажения глаз может видеть два, три и больше предметов. Движение предмета может ускоряться или замедляться плавно или скачкообразно в направлении вращения или в обратном, или же казаться находящимся в состоянии покоя. Эти явления и составляют так называемый стробоскопический эффект [46, 63].

Стробоскопический эффект используют для измерений, когда требуется определять очень большие скорости вращения валов или частоты колебаний деталей и отсутствует возможность их редуцирования или же на исследуемом объекте не предусмотрена возможность подключения обычного тахометра. С этой целью объект освещают мощным источником пульсирующего потока света, допускающего регулирование частоты импульсов в широких пределах.

Для облегчения наблюдений за вращающимся валом на него наносят белую черту и регулируют частоту импульсов источника света так, чтобы получалось неподвижное стробоскопическое изображение вала и, следовательно, белой черты на нем. Однако неподвижному изображению может соответствовать как равенство, так и кратность числа оборотов вала числу импульсов стробоскопа. Так, одно неподвижное изображение наблюдается при вспышках осветительной лампы с частотой $1/2$, $1/3$ и т. д. от числа оборотов вала. При частоте импульсов, в 2—3 раза большей числа оборотов вала, на последнем наблюдается стробоскопическое изображение двух, трех и большего количества отметок, равно отстоящих друг от друга по окружности.

Поэтому возможны грубые ошибки измерений — промахи. Чтобы избежать их, следует начинать измерение с частоты импульсов, заведомо большей числа оборотов вала, и путем плавного регулирования множественное изображение сводить к одному.

По способу получения нужного для наблюдения пульсирующего потока света или по обтурации (отсечке наблюдаемых кадров) тахометры рассматриваемого типа разделяют на стробоскопические и электростробоскопические. В первых отсечка кадров, освещаемых постоянным источником света, достигается механическим путем с

помощью вращающегося дискового или колеблющегося щелевого об-
тюратора, вторые основаны на световой отсечке кадров, получаемой
путем освещения наблюдаемого объекта прерывистыми лучами света
с регулируемой частотой импульсов. Для этой цели применяют стро-
ботроны, безынерционные газосветовые неоновые и ксеноновые
лампы, обеспечивающие четкое освещение исследуемого объекта.
Чтобы повысить интенсивность освещения и получить направленные
лучи, лампу снабжают рефлектором
и закрепляют ее на переносной
подставке.

Для нужд лабораторий двигате-
лей обычно применяют электриче-
ские, а точнее электронные стробота-
хометры, которые при умелом поль-
зовании обеспечивают измерения с
точностью до $\pm 1\%$ и более высокой.
Принципиальная схема электростро-
боскопического тахометра показана на рис. V. 5.
Колебательная система его состоит из
электронной лампы 5, трансформато-
ра 3, конденсатора 2 и сопротивле-
ния 1. Частота колебаний задается
контуром из конденсатора 2 и сопро-
тивления 1, с помощью которого вы-
бирают нужную частоту. Газосвет-
ная лампа 4 включена в цепь ано-
да лампы параллельно трансформато-
ру 3 [55].

Действие такого тахометра заключается в следующем. В момент,
когда отрицательное напряжение на сетке электронной лампы 5 стан-
ет меньше, чем напряжение, запирающее лампу, в электронной лам-
пе возникнет анодный ток, возрастающий по мере того, как умень-
шается отрицательное напряжение на сетке лампы.

Во вторичной обмотке трансформатора анодный ток индуцирует
напряжение, вследствие чего конденсатор заряжается, причем на его
обкладке, соединенной с сеткой лампы 5, возникает отрицательное
напряжение, запирающее лампу. Это приводит к исчезновению анод-
ного тока, вызывая в первичной обмотке трансформатора э. д. с. са-
моиндукции, которая повышает напряжение на концах обмотки. В
момент, когда разность потенциалов на обмотке трансформатора стан-
ет равна напряжению зажигания газосветной лампы, возникнет им-
пульс тока, и лампа даст вспышку света. Так как сетка лампы 5 за-
землена через переменное сопротивление 1, то конденсатор разря-
жается тем быстрее, чем меньше величина сопротивления 1. Как толь-
ко напряжение на обкладке конденсатора достигнет величины запи-
рающего напряжения, описанный цикл явлений повторится.

Таким образом, регулируя величину сопротивления 1, изменяют
время разряда конденсатора, а следовательно, изменяют и частоту
импульсов лампового генератора. Отсчет числа импульсов, равных

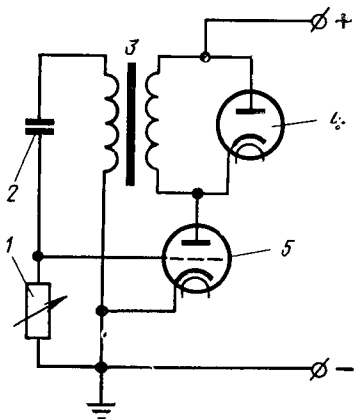


Рис. V. 5. Принципиальная
схема электростробоскопи-
ческого тахометра

числу оборотов вала машины при оговоренном выше условии, производят по шкале, заранее проградуированной в зависимости от положения рукояток, с помощью которых регулируют величину сопротивления.

На рис. V.6 показан электрический строботаксметр СТ-МЭИ, изготавливаемый Московским энергетическим институтом. Кроме определения скорости вращения валов и частоты колебаний деталей, прибор позволяет также изучать характер рассматриваемого движения.

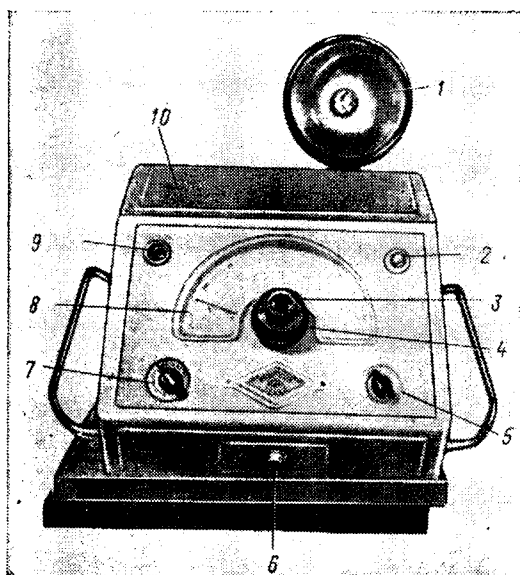


Рис. V.6. Электрический строботаксметр СТ-МЭИ

Включают его в сеть переменного тока напряжением 127 или 220 В. Прибор имеет три диапазона измерений $300 \div 1200$; $1200 \div 6000$ и $6000 \div 30\,000$ об/мин.

Электростроботаксметр МЭИ состоит из осветителя, выпрямителя питания импульсной лампы, системы ее зажигания, включающей в себя тиратронный формирователь импульсов поджига, и задающего генератора, собранного по схеме самоходного мультивибратора с отрицательной обратной связью на электронных лампах. Частоту генератора устанавливают дискретно переключателем диапазонов и плав-

но с помощью переменного конденсатора. Осветитель представляет собой переносную импульсную лампу с рефлектором. В корпусе лампы, выполненном отдельно от корпуса 10 прибора, смонтированы импульсный трансформатор и устройство регулировки искрового промежутка. Для фокусировки освещения цоколь импульсной лампы можно перемещать вдоль своей оси.

Включают прибор поворотом переключателя 7 из положения *Выкл* в положение *Сеть*. После 2—3 мин прогрева при горящей сигнальной лампе 2 переключатель 7 переводят в рабочее положение *Лампа*. С целью повышения точности измерений время прогрева увеличивают до 10—15 мин.

Перед началом измерения прибор выверяют. Импульсную лампу 1 наводят на окно 9 вибратора, имеющего строго определенное число колебаний, и с помощью регулировочных витков, расположенных под крышкой 6, добиваются неподвижного изображения вибратора: на первом диапазоне шкалы с отметкой 1000 об/мин — одно неподвиж-

ное изображение; на втором диапазоне на отметке 3000 об/мин — одно неподвижное изображение и на третьем диапазоне на отметке 12 000 об/мин — два неподвижных изображения.

В процессе измерения частоту вспышек лампы регулируют рукоятками 3 (тонкой настройки) и 4 (грубой настройки) на диапазоне, заранее установленном переключателем 5. После получения одного стробоскопического изображения на испытуемом объекте по

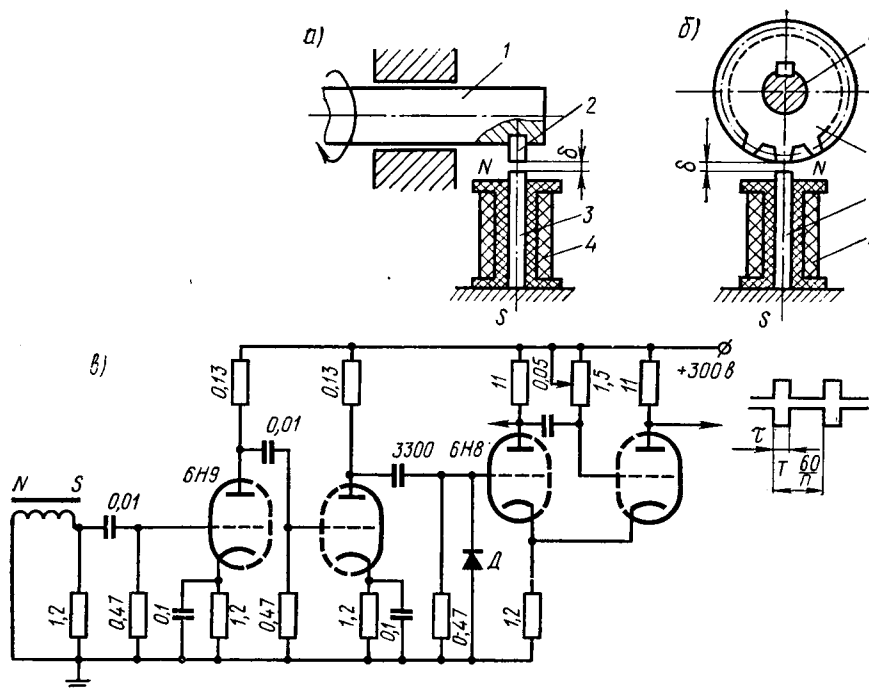


Рис. V. 7. Принципиальная схема электронного тахометра:

а — индукционный датчик со штифтом; б — датчик с зубчатым венцом; в — схема включения датчика (формирующее звено прибора)

рабочему диапазону шкалы 8 отсчитывают число оборотов испытуемого вала (в направлении против часовой стрелки).

Электронный строботахометр МЭИ на всем возможном для него диапазоне обеспечивает точность измерений $\pm 1\%$. При изменении напряжения источника питания на $\pm 15\%$ дополнительные погрешности не превышают $\pm 0,2\%$.

Для целей испытания двигателей такая точность достаточна. А в случае необходимости повысить точность до $0,1\%$ и выше применяют стробоскопические тахометры с камертонными, кварцевыми или иными системами стабилизации частоты генераторов питания импульсных ламп.

Кроме стробоскопических в качестве тахометров, не требующих механической связи с валом испытуемой машины, в настоящее время широко применяют различные электронные импульсные устройства.

Электронные тахометры основаны на безынерционном действии электронных измерительных устройств, работающих с индукционными или фотоэлектрическими входными преобразователями. Последние служат бесконтактными импульсными датчиками, посылающими в измерительное устройство кратковременные электрические импульсы через каждый оборот или долю оборота вала испытуемой машины. Поэтому электронные тахометры называют также импульсными. Регистрирующим устройством их служат электронные частотомеры, действующие на принципе заряда-разряда конденсатора или по иным схемам часто с цифровой индикацией результатов, основанной на автоматическом повторении счета через определенные промежутки времени (0,1÷3,0 с).

В импульсных индукционных тахометрах датчики могут служить любые катушки индуктивности, поскольку под действием переменного или пульсирующего магнитного потока в них наводится в соответствии с существующей закономерностью некоторая э. д. с. (В):

$$E = -\omega (d\Phi/dt) 10^{-8},$$

где ω — число витков катушки; Φ — магнитный поток постоянного магнита.

Варианты конструкции датчиков показаны на рис. V.7, а, б [27].

На носок вала 1, скорость вращения которого измеряют, ставят небольшой штифт 2 из магнитомягкого материала, а в случае изготовления самого носка из такого материала достаточно снять на ней лыску. К штифту 2 подводят постоянный магнит 3 с надетой на него катушкой 4, изготавливаемой из провода ПЭ-0,08÷0,1 и состоящей из 1000÷2000 витков. Магнит относительно штифта 2 устанавливают с зазором $\delta = 0,5 \div 1,5$ мм, причем стремятся возможно уменьшить его и получить за этот счет большее выходное значение E . При вращении вала в катушке индуцируются сравнительно короткие импульсы напряжения, посылаемые далее в измерительную цепь.

Вместо штифта на носок вала 1 или вообще на вал испытательной установки можно ставить зубчатый венец 2' с равномерно расположенными выступами по его окружности. Вследствие этого частота поступления импульсов в измерительную цепь резко возрастает. В двигателях с воспламенением смеси в цилиндрах электрической искрой катушку датчика целесообразно устанавливать непосредственно на проводе высокого напряжения системы зажигания.

Поскольку амплитуда получаемых импульсов сильно зависит от числа оборотов вала, то для повышения точности измерения импульсы пропускают через формирующее звено, которое выравнивает их амплитуду и длительность при той же частоте.

Принципиальная схема такого упрощенного звена приведена на рис. V.7, в. Напряжение, усиленное и ограниченное двухкаскадным усилителем на лампе 6Н9, с выхода датчика поступает на дифференцирующую цепь, которая формирует разнополярные короткие импульсы. Благодаря диоду Д на сетку левого триода 6Н8 с этой цепи попадают только положительные импульсы, запускающие ждущий

мультивибратор с катодной связью. Амплитуда и длительность прямоугольных импульсов на выходе мультивибратора определяются лишь его параметрами и практически не зависят от формы запускающих импульсов. Поэтому в цепь указателя тахометра, которым служит соответствующий электронный частотомер, поступают практически одинаковые по форме импульсы независимо от числа оборотов вала двигателя.

В импульсных фотоэлектрических тахометрах датчиком служат фотоэлементы с внешним или внутренним фо-

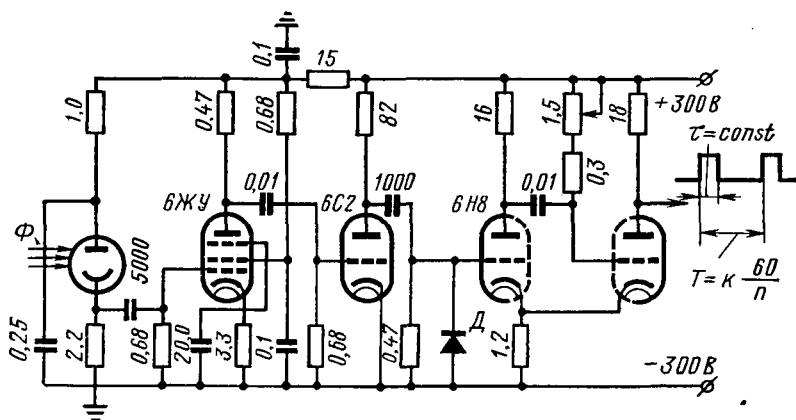


Рис. V.8. Схема включения фотоэлектрического датчика электронного тахометра

тоэффектом. Предпочтительнее первые из них, поскольку фотосопротивления, как отмечалось ранее, обладают некоторой инерцией. Схема установки фотоэлементов в принципе не отличается от показанной на рис. IV.13, причем диск с отверстиями или радиальными прорезями либо вертушка с лопастями могут быть установлены как на носке вала двигателя, так и на другом подходящем участке вала испытательной установки.

Вращающиеся перфорированные диски или лопасти прерывают луч света, попадающий на фотоэлемент от осветительной лампы. Благодаря этому падение напряжения фототока приобретает характер коротких импульсов, частота следования которых определяется числом оборотов вала машины. Чтобы не прибегать к усилителям постоянного тока при работе на режимах с относительно малыми числами оборотов, применяют диски с большим количеством просветов.

Принципиальная схема включения фотоэлектрических датчиков с безынерционным вакуумным фотоэлементом показана на рис. V.8 [27]. В схеме применен усилитель переменного тока, который проще и надежнее усилителей постоянного тока. Усиленные импульсы напряжения фототока формируются в импульсы, постоянные по амплитуде и длительности, и откалиброванными поступают в электронный частотомер.

Электронные тахометры не уступают по точности электрическим, магнитным и стробоскопическим и даже превосходят лучшие из них. По быстродействию они соизмеримы только со стробоскопическими. При работе с вакуумными фотопреобразователями импульсные тахометры позволяют измерять скорости вращения до сотен тысяч оборотов в минуту.

Тахоскопы основаны на совместном действии счетчика оборотов и часового механизма, который автоматически подключает и отклю-

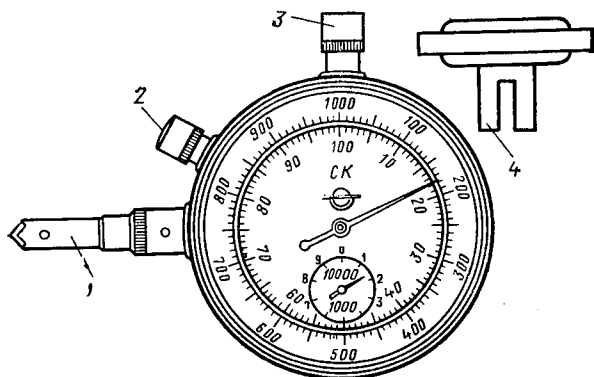


Рис. V.9. Общий вид тахоскопа СК

чает стрелочный указатель прибора при вращении его приводного валика. Продолжительность замера составляет $2 \div 5$ с и для данного прибора является величиной постоянной, вследствие чего стрелка прибора отклоняется пропорционально частоте вращения вала. Это и позволяет градуировать шкалу прибора непосредственно в оборотах вала в минуту.

Тахоскопам или тахометрам часового типа свойственна высокая точность, составляющая доли процента. Поэтому они служат и в качестве контрольных приборов. На рис. V.9 показан известный тахометр этого типа производства Чистопольского часового завода, который позволяет измерять как угловую, так и линейную скорости. В последнем случае на его валик 1 надевают дисковый наконечник 4, имеющий диаметр 31,52 мм. При измерении валик тахоскопа, так же как и приставного центробежного тахометра, присоединяют к валу объекта, скорость которого измеряют, и нажимают пусковую кнопку 3. Вначале заводится часовой механизм, а в следующий момент автоматически включается стрелочный указатель счетчика. В положении замера тахоскоп держат до остановки стрелки указателя. Затем по шкале прибора отсчитывают число оборотов вала в минуту и нажатием на кнопку 2 сброса возвращают стрелку указателя в исходное положение.

Тахометры и собственно тахоскопы облегчают задачу настройки на нужный скоростной режим и контроля за поддержанием его в процессе работы и в этом качестве совершенно необходимы для прове-

дения стендовых испытаний двигателей. Обработку результатов измерений, как правило, базируют на показаниях суммарных счетчиков, которые в отличие от тахометров фиксируют не мгновенное число оборотов вала, а фактическое за время замера (с учетом погрешностей метода). Это повышает достоверность определения экономических и других показателей двигателя и путем пересчета позволяет находить среднюю скорость вращения вала за время замера.

Тахографы представляют собой приборы, состоящие из центростремительного тахометра и часового механизма, обеспечивающих в процессе измерения непрерывную запись значений угловой скорости по времени на равномерно перемещающейся диаграммной ленте. Тахографы необходимы при исследовании разгона двигателя, т. е. динамики нарастания числа оборотов его вала по времени.

§ V.3. Суммарные счетчики числа оборотов

Суммарные счетчики числа оборотов, применяемые в лабораториях двигателей, выполняют стационарными и приставными, так же как тахометры, причем к валу их подключают по аналогии с по-

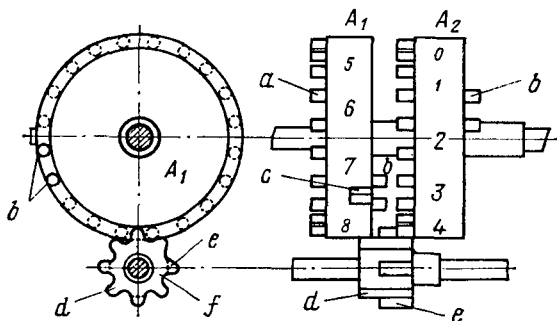


Рис. V.10. Суммарный счетчик числа оборотов

следними. Но постоянную кинематическую связь с валом стационарные счетчики имеют только в отдельных случаях, когда это предусмотрено программой испытаний, например, износных. В обычных условиях суммарный счетчик включают лишь на время замера числа оборотов вала.

По принципу действия суммарные счетчики разделяют на механические, электромеханические, электронные или импульсные и другие; по конструктивному признаку — роликовые, дисковые, стрелочные и цифровые.

Механический суммарный счетчик состоит из ряда зубчатых роликов, кинематически связанных между собой, как показано на рис. V.10. Число зубьев на роликах кратно 10. Первый из роликов поворачивается на $1/10$ окружности при каждом обороте вала двигателя. А так как на цилиндрической поверхности ролика нанесены цифры от 0 до 9, то через каждый оборот испытуемого вала цифры по

порядку появляются в окошечке для наблюдения. При переходе от цифры 9 к 0 первичный ролик посредством промежуточной шестерни поворачивает следующий ролик десятков на $1/10$ окружности. От второго ролика десятков таким же путем движение передается третьему ролику сотен и т. д. Следовательно, число, которое наблюдатель прочтет в смотровом окошечке, после окончания замера покажет суммарное количество оборотов вала двигателя, сделанное за время замера.

Конструктивно этот простейший и весьма точный счетный механизм выполнен следующим образом. Каждый его цифровой ролик с одного торца снабжен 20 зубьями-цевками a , а с другого — двумя цевками b , поставленными по краям выреза c . Каждая пара цифровых роликов связана между собой посредством промежуточной шестерни, имеющей восемь зубьев, из которых четыре зуба d — полной, а другие четыре зуба e — половинной длины.

Когда соседние ролики находятся в положении, показанном на рисунке, ролик A_2 не будет поворачиваться, так как ему мешает промежуточная шестерня f , которая двумя длинными зубцами d упирается в обод ролика A_1 . Но как только ролик A_1 своим вырезом c подойдет к шестерне f , цевки b зацепятся с зубцами d и повернут шестерню на два зубца. При этом длинный зубец пройдет через вырез и промежуточная шестерня другим концом повернет ролик A_2 тоже на два зубца. Вследствие этого в окошечке для наблюдения появится очередная порядковая цифра. Ролик A_3 в свою очередь с правой стороны также имеет две цевки b , поставленные по краям выреза, поэтому с помощью соответствующей промежуточной шестерни за один свой оборот будет поворачивать на $1/10$ оборота следующий за ним цифровой ролик и т. д.

Продолжительность замера определяется секундомером, который включают и выключают одновременно со счетчиком. Перед началом замера и счетчик оборотов, и секундомер устанавливают на нуль.

Таким образом, для измерения суммарного числа оборотов вала за данный отрезок времени в рассмотренном случае требуется два прибора: счетчик оборотов и секундомер. Это затрудняет работу и снижает точность измерения. Поэтому предпочтительнее комбинированные приборы, в которых счетчик оборотов и секундомер управляются одной общей кнопкой. Подобные приборы, как отмечалось, называют иногда тахоскопами. Но это верно только в том понимании, что путем пересчета можно определить среднее число оборотов вала в минуту.

Для современных лабораторий двигателей характерно дистанционное управление испытательными установками. В этих условиях приставные суммарные счетчики оборотов применяют весьма ограниченно. Основные измерения обычно делают с помощью импульсных электромеханических и электронных устройств, позволяющих вести наблюдения на большом расстоянии от объекта испытаний.

Электромеханические суммарные счетчики представляют собой импульсные устройства, работающие от контактного датчика, размещаемого на валу двигателя или испытательной установки. Датчик

выполняют в виде обычного прерывателя системы зажигания двигателей с искровым воспламенением. Суммарным счетчиком оборотов в принципе может при этом быть любая электромеханическая, электромагнитная или электронная счетная система, обладающая достаточной скоростью счета.

На практике применяют быстродействующие электромагнитные счетчики с цифровыми роликами, кинематически связанными между собой по рассмотренной ранее системе десятичного отсчета. Но чаще всего используют электромеханические, известные больше под названием электроимпульсные счетчики типа СБ-1/100. Это компактный стрелочный двухциферблатный прибор, позволяющий фиксировать каждый оборот вала двигателя. Продолжительность отсчета импульсов измеряют при этом механическими или электрическими секундомерами, которые включают и выключают одновременно со счетчиком импульсов.

В качестве электрического секундомера можно использовать синхронный электродвигатель, питающийся от сети переменного тока со стабилизированной частотой, или же включать в эту сеть второй импульсный прибор, например СБ-1/100, через трансформатор, понижающий напряжение питания до 24—36 В.

Электрическим секундомером и счетчиком оборотов управляют общей для них кнопкой включения, что повышает точность измерений. Очевидно, продолжительность замера при зафиксированном счетчиком времени числе импульсов i_n составит $t = i_n/50$ с или $t = 2 i_n/100$ с, что удобнее для практического пользования.

Электронные суммарные счетчики так же, как механические и электромеханические, действуют по системе десятичного отсчета числа импульсов, но отличаются большой скоростью и безынерционностью счета. Основным структурным элементом таких счетчиков служат ламповые или полупроводниковые декадные счетчики числа импульсов, позволяющие фиксировать каждый оборот вала испытуемой машины, а в случае применения так называемого пересчетного устройства — число импульсов, пропорциональное числу оборотов вала.

Действие счетных декад можно понять на примере одного из возможных вариантов лампового декадного счетчика импульсов, идея которого заключается в применении нескольких групп электронных ламп по девять штук в каждой. Лампы включают так, что каждый приходящий импульс отпирает только одну очередную лампу первой группы, отсчитывающую единицы. Десятый импульс гасит или, как говорят, запирает всю эту группу из девяти ламп и отпирает первую лампу второй группы, отсчитывающей десятки. Далее счет продолжается опять с первой лампы первой группы и в такой же последовательности срабатывают группы сотен и тысяч. Если лампы в каждой из компактно расположенных групп пронумеровать, то после истечения времени отсчета и остановки системы легко прочитать суммарное число оборотов вала за данный отрезок времени.

Такие электронные системы обладают огромным быстродействием и обеспечивают отсчет импульсов без пропусков при любых возмож-

ных для двигателя внутреннего сгорания скоростных режимах работы. Например, пересчетный прибор типа ПС-100, пригодный для рассматриваемых целей, обеспечивает скорость счета до 100 кГц, имея емкость 10^6 импульсов [14].

Импульсы во входной узел электронных счетчиков поступают от датчиков, в качестве которых используют индукционные и фотоэлектрические преобразователи, конструкция которых одинакова с рассмотренными выше датчиками электронных импульсных тахометров.

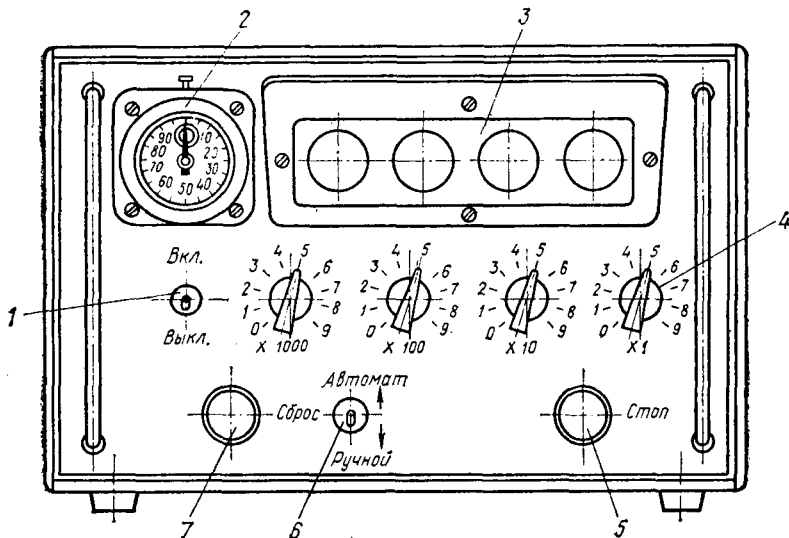


Рис. V.11. Электронный полупроводниковый импульсный счетчик ЕСА-3

Датчики этого типа не требуют контактной связи с валом испытуемого объекта, что повышает точность и надежность системы.

Продолжительность замера обычно определяют с помощью электрических секундомеров, которые включаются в общую систему счетного устройства и управляются общей для них кнопкой. Опыт показывает, что в качестве электрических секундомеров целесообразно применять типовые импульсные счетчики (частотомеры) с цифровой индикацией. Они удобны для наблюдений и позволяют обходиться аппаратурой общего назначения.

Так, для измерений числа оборотов и времени отсчета широко используют, например, электронные полупроводниковые импульсные счетчики типа ЕСА-3 с программным задатчиком и цифровой индикацией счета. Панель управления такого счетчика показана на рис. V.11.

На панели управления расположены: 1 — тумблер включения прибора в сеть; 2 — электромеханический счетчик числа замеров (в практике испытаний двигателей обычно не используют); 4 — переключатели задатчика; 5 — кнопка отключения исполнительного механизма;

6 — тумблер переключения на непрерывный или предельный режимы работы счетчика; 7 — кнопка ручного сброса результатов отсчета. На верхней части панели расположены четыре цифровые индикаторные лампы 3, а на задней стенке счетчика — предохранитель и четырнадцатиконтактный разъем для подключения датчика, осветителя, электрического секундомера и сетевой вилки.

Датчиком счетчика служит безынерционный фотопреобразователь с внешним фотоэффектом, импульсы от которого поступают в формирующий каскад для преобразования выходного напряжения датчика в запускающие сигналы триггера (спускового устройства) первой декадной ячейки. Счетчик имеет четыре полупроводниковые декадные ячейки, столько же переключателей-дешифраторов 4 для установки программы счета (при необходимости), четыре электрических ключа, расшифровывающих состояние декад, и четыре счетные цифровые лампы тлеющего разряда типа ИН-1.

При непрерывном счете как с исполнительным механизмом, так и без него тумблер 6 должен находиться в верхнем положении. В этом случае счетчик после выполнения установленной программы счета автоматически сбрасывает показания и начинает новый счет. При нижнем положении тумблера 6 счет прекращается после выполнения программы и одновременно передается сигнал во внешнюю цепь. Например, счетчик, работающий как секундомер от сети переменного тока, подает сигнал во второй такой же счетчик на прекращение счета числа оборотов вала. Последующее измерение можно начинать после нажатия кнопки 7 *Сброс*.

Счетчик ЕСА-3 потребляет не более 50 Вт, напряжение питания приборов 220 В при 50 Гц и питания осветителя 6 В. Нормальная рабочая температура $5 \div 40^\circ \text{C}$ при относительной влажности воздуха 80%. Максимальная емкость при разовом непрерывном счете 9999, скорость счета 10^4 Гц без исполнительного механизма и 50 Гц с исполнительным механизмом. Погрешность счета отсутствует.

§ V.4. Измерение времени

Продолжительность отдельных замеров, как указывалось ранее, определяют механическими и электрическими секундомерами. Особенно широко применяют электрические секундомеры, в качестве которых используют либо синхронные двигатели, либо электронные импульсные счетчики — частотомеры, легко вписывающиеся в общую систему управления другими приборами. Это значительно облегчает задачу автоматизации и программирования процессов измерения различных параметров.

Принципиальная схема синхронных электрических двигателей показана на рис. V.12 [55]. Такие двигатели включают в сеть переменного тока со стабилизированной частотой. Чтобы создать вращающееся магнитное поле, оба полюса электромагнита 1 разрезаны прорезью и на один из выступов с каждой стороны надеты кольца 2 и 4 из красной меди. Вследствие этого возникает разность фаз магнитных

потоков в полюсах, образуется переменное поле, в котором якорь 3, имеющий накоротко замкнутую обмотку, начинает вращаться при подключении двигателя к сети.

Число оборотов вала двигателя при частоте переменного тока f и числе пар полюсов p составляет $n=60f/p$. Поэтому при $f=50$ Гц и $p=1$ двигатель развивает 3000 об/мин. Мощность таких двигателей

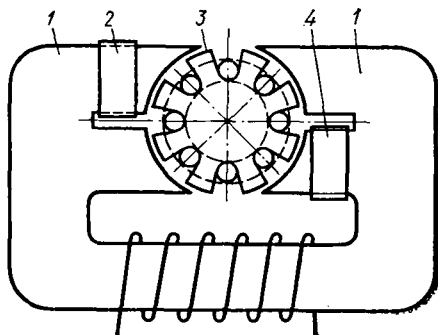


Рис. V.12. Принципиальная схема синхронного электрического двигателя, используемого для измерения времени

не превышает 4 Вт. Якорь их через зубчатую передачу соединяют со стрелками, указывающими время, или с механизмом для привода бумажной ленты самопишущих приборов (тахографов и др.).

Для отсчета времени чаще всего применяют электронные частотомеры, основанные на принципе дискретного счета импульсов различных генераторов образцовой частоты, которые позволяют измерять время с точностью, на несколько порядков превышающую ино-

гда точность измерения других физических величин. Такие частотомеры или счетно-импульсные хронометры отличаются высокой универсальностью и, несмотря на многообразие их конструкций, имеют блок-схемы, аналогичные показанной на рис. V.13, основу которых составляют: генератор образцовой частоты ГОЧ, бесконтактный ключ К и счетчик импульсов СИ [45].

Поступающие на вход сигналы начала и конца измерения интервала времени после усиления в усилителе У и формирования идут на вход бесконтактного ключа К. Стартовый сигнал переводит ключ в положение *Замкнут*, и с этого момента колебания генератора ГОЧ поступают на вход счетчика импульсов СИ до тех пор, пока остановочный сигнал не переведет ключ в положение *Разомкнут*. Поэтому счет колебаний генератора ведется только в течение измеряемого интервала времени.

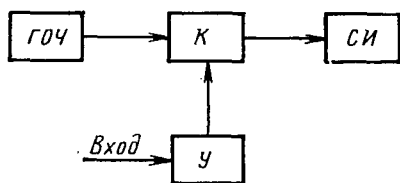


Рис. V.13. Блок-схема счетно-импульсного хронометра

Типичным примером может служить известный отечественный электронно-счетный прибор ЧЗ-32, построенный по классической схеме частотомеров, в которых подсчитывается число периодов известной частоты за известный высокоточный отрезок времени, называемый временем измерения. На его семиразрядном цифровом указателе автоматически регистрируются измеряемые параметры как результат последовательного деления частоты опорного генератора десятичными ступенями. Основными узлами блок-схемы прибора явля-

ются: кварцевый генератор *КГ*; делители базы времени *ДБВ*; блок автоматики *БА*; входные усилители-формирователи импульсов *УФИ*; селектор (бесконтактный ключ) *С*; блок счетных декад *БСД*; блок цифровой индикации результатов измерения *БЦИ* и блок питания *БП* (рис. V.14). Частотомер снабжен внешним пуском *ВП* и пуском *П* печатающего устройства.

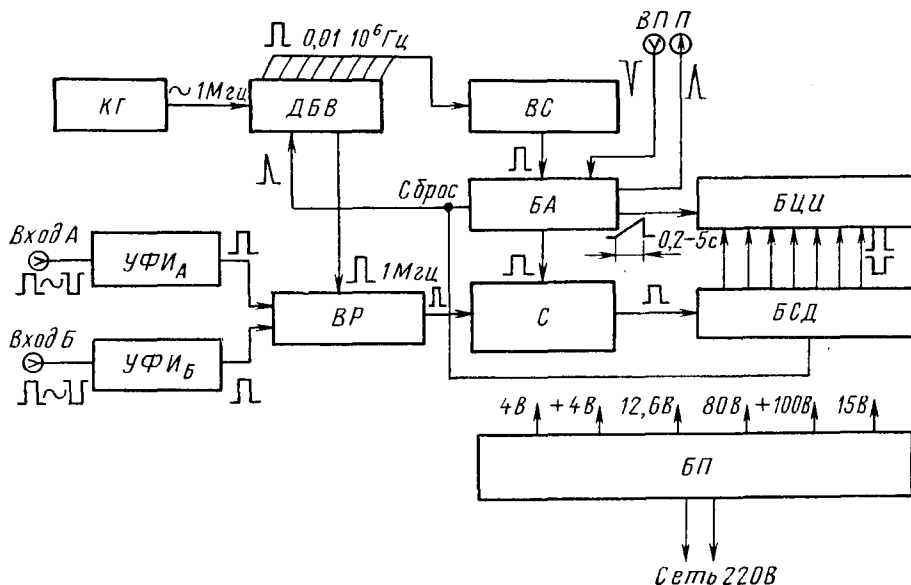


Рис. V.14. Блок-схема электронно-счетного частотомера ЧЗ-32

Кроме интервалов времени, которые можно измерять в пределах от 10 мкс до 100 с при любой полярности и амплитудах 0,5÷100 В, прибор позволяет также измерять еще ряд параметров:

1) частоту синусоидальных колебаний в диапазоне 10 Гц÷3 МГц при входных напряжениях 0,1÷100 В с погрешностью самого кварцевого генератора (не превышающей в нормальных условиях $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ ± единица счета;

2) длительность импульсов любой полярности от 10 мкс до 10 мс, имеющих амплитуду 0,5÷100 В, с погрешностью не более погрешности опорного генератора $\pm$ один период частоты заполнения при крутизне фронтов не менее 0,25 В/мс;

3) скорость или частоту вращения вала в диапазоне 60÷600 тыс. об/мин при наличии фотоэлектрического преобразователя частотомера ЧЗ-28;

4) число оборотов вала при работе в режиме суммирования и с такими же параметрами входного сигнала, как в случае измерения частоты колебаний;

5) отношение двух частот.

Кроме того, частотомер может работать в режиме самоконтроля. Вид работы прибора задается переключателями вида работ *ВР* и

времени счета *ВС*. Частотомер потребляет не более 45 Вт, напряжение питания 220 В, 50 Гц. Время непрерывной работы 16 ч при температуре от -30 до $+50^{\circ}\text{C}$ и максимальной влажности воздуха до 98% (при температуре $+35^{\circ}\text{C}$). Прибор отличается портативностью и малой массой (до 9 кг), может быть использован как в лабораторных, так и в полевых условиях для выполнения любого из указанных видов (рода) работы.

В отдельных случаях целесообразно бывает применять механические секундомеры. Контрольные секундомеры этого типа с балансом, делающим 180—360 тыс. колебаний в час, позволяют измерять время с точностью 0,02—0,01 с. Но в лабораторной практике чаще всего используют не контрольные, а обыкновенные секундомеры с балансом, делающим 18 тыс. колебаний в час, с точностью отсчета 0,2 с. Такие секундомеры более портативны, удобны в работе и обеспечивают точность отсчета, вполне достаточную для практических целей, особенно при ручном способе управления отдельными измерительными приборами и устройствами.

§ VI.1. Общие сведения

Давление жидкостей и газов в емкостях и потоках измеряют различными указывающими, самопишущими и сигнализирующими приборами, называемыми в общем *манометрами*.

По назначению приборы измерения давлений строго разделяют на манометры масла, топлива, воды, воздуха, кислорода, ацетилена и т. д. (применение манометра в целях, для которых он не предназначен, опасно), а по принципу действия их чувствительных элементов (датчиков, приемников), передающих и регистрирующих звеньев — на механические и электромеханические. Среди этих групп выделяют: жидкостные, пружинные, поршневые и другие манометры, а также манометры с электрическими преобразователями.

Выбор нужных приборов измерения давлений определяется назначением и принятой методикой исследования, желаемой точностью измерения и диапазоном измеряемых давлений. В лабораториях двигателей приборы давлений применяют при настройке двигателей на заданный режим испытаний, для контроля за работой их систем и определения давления в окружающей среде, а также в устройствах, измеряющих расход жидкостей и газов. Этим целям вполне отвечают обычные указывающие жидкостные и пружинные приборы различных модификаций.

Так, манометрами и пьезометрами измеряют избыточные давления; мановакуумметрами и пьезометрами — давления ниже атмосферного; барометрами — давления в окружающей среде. Наиболее широко применяют жидкостные манометры, обладающие универсальностью и высокой точностью.

Величины давлений выражают в единицах градуировки существующих лабораторных приборов: кгс/см^2 , мм вод. ст., мм рт. ст. и миллибарах (мбар). В новой международной системе единиц СИ давления выражают в Н/м^2 , но приборов с такой градуировкой пока не выпускают.

Необходимыми условиями эффективного использования любого из перечисленных приборов являются правильное ориентирование их в пространстве, надежная защита от вибраций, толчков и соблюдение норм подключения к местам замера. Если рабочее положение прибора вертикальное или горизонтальное, то это неукоснительно должно выполняться. Правильное подключение приборов к месту замера особенно важно при измерении давлений в потоках.

В потоках чаще всего приходится измерять статическое давление. Обычно это делают через отверстие в стенке канала, исходя из того, что давление на стенке такое же, как и в потоке, в направлении по нормали к стенке. Поэтому к расположению и форме отверстия, через которое измеряют давление, предъявляют повышенные требования. Именно, ось отверстия должна быть перпендикулярна стенке, а диаметр отверстия не должен превышать 1,0 мм. Кроме того, стенка перед отверстием должна быть совершенно гладкой, без выступов, впадин и рисок, а кромки отверстия — без заусенцев и фасок. К сожалению, на практике отверстие под приемный штуцер прибора часто сверлят с выходом большого сверла в обследуемый канал и несколько не заботятся, чтобы поставить штуцер хотя бы заподлицо со стенкой. Эти и другие нарушения в размещении приемника, каковым для приборов давления является отверстие в стенке канала, искажают результаты измерений.

Названные приборы позволяют измерять средние величины давлений. Приборы измерения нестационарных давлений, в частности давлений в цилиндре двигателя, рассматриваются в отдельной главе.

§ VI.2. Жидкостные манометры

Жидкостные манометры, называемые также *пьезометрами*, в простейшем исполнении представляют U-образные стеклянные трубки, заполненные жидкостью строго до нулевых отметок. К месту замера они могут быть подключены двояко.

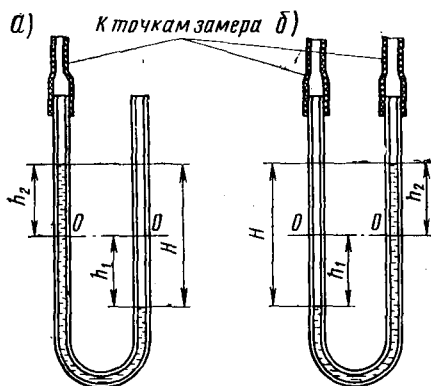


Рис. VI.1. Жидкостный U-образный манометр:

а — обычный; б — дифференциальный

В первом случае одну ветвь их соединяют с местом замера, а другую оставляют открытой. При такой схеме подключения U-образные приборы измеряют разницу между атмосферным и абсолютными давлениями в месте замера.

Если при этом окружающее атмосферное давление больше измеряемого, то жидкость перемещается в сторону, показанную на рис. VI.1, а, и приборы фиксируют разницу между атмосферным и измеряемым давлениями, называемую *разрежением*. Величина его независимо от диаметра стеклянной трубки равна сумме столбов жидкости $H = h_1 + h_2$. Величину разрежения обычно выражают в мм водяного, ртутного или другого столба жидкости, которой заполнен пьезометр.

Если окружающее атмосферное давление оказывается меньше измеряемого, то жидкость переместится в сторону открытой ветви

и пьезометр покажет давление, избыточное над атмосферным, равное тоже сумме $h_1 + h_2 = H$. Тогда абсолютное давление в месте замера

$$p_{\text{абс}} = H\rho_{\text{ж}}g + p_0,$$

где g — ускорение силы тяжести; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, заполняющей манометр; $H\rho_{\text{ж}}g$ — избыточное давление; p_0 — окружающее атмосферное давление, выраженное в тех же единицах, что и избыточное давление.

Во втором случае обе ветви U-образной трубки подсоединяют к местам, в которых измеряют давления (рис. VI.1, б). Тогда жидкостный манометр показывает разность между двумя измеряемыми давлениями:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = H\rho_{\text{ж}}g = (h_1 + h_2)\rho_{\text{ж}}g,$$

где p_1 и p_2 — измеряемые давления.

Манометры, подключаемые по такой схеме к местам измерения давлений, называют *дифференциальными*.

Жидкостные U-образные манометры универсальны, имеют простую конструкцию, отличаются точностью и их можно размещать на значительном удалении от места замера, однако им присущи также некоторые недостатки. Трудно, например, одновременно в обеих ветвях фиксировать положение уровней жидкости, особенно в условиях всегда возможных колебаний измеряемых давлений, что требует много времени и снижает точность отсчета. Сравнительно небольшая прочность стеклянных трубок, легко разрушающихся от толчков и повышенной вибрации; необходимость строго вертикальной установки пьезометрических трубок и другие недостатки.

При измерении давлений или перепада давлений в пульсирующих потоках и в потоках с резко изменяющимся режимом течения, вызывающим соответствующие колебания жидкости в манометре, между пьезометрическими трубками вводят дополнительное гидравлическое сопротивление. Такое сопротивление представляет собой пробочку с небольшим отверстием, подобранную из расчета целесообразного уменьшения амплитуды колебания жидкости в приборе.

В целях облегчения работы наблюдателя в журнал испытаний вносят обе наблюдаемые величины h , с последующим их суммированием при обработке результатов.

Задача наблюдений упрощается, а точность повышается, если удастся изготовить пьезометр из калиброванных стеклянных трубок. Тогда $h_1 = h_2$ и общий перепад $H = 2h_1 = 2h_2$. Поэтому наблюдать и вносить в журнал можно показания одной ветви с последующим ее удвоением. В данном случае перед наблюдателем целесообразно размещать лишь одну ветвь пьезометра, а вторую выносить за приборную доску. При нескольких пьезометрах это повышает компактность пьезометрического щита и облегчает работу наблюдателя. Заметим, что установку на нуль и отсчеты следует при этом вести по одному и тому же мениску, для смачиваемых жидкостей предпочтительнее по нижнему.

В технике измерений широко применяют также пьезометры чашечного типа, в которых одну из ветвей заменяет резервуар. Поэтому в отличие от U-образных, они имеют только одну пьезометрическую трубку. Нижний ее конец соединен с резервуаром, а верхний — с трубкой, идущей к месту замера, как показано на рис. VI.2, а. (При измерении избыточных давлений к месту замера подключают не трубку, а резервуар).

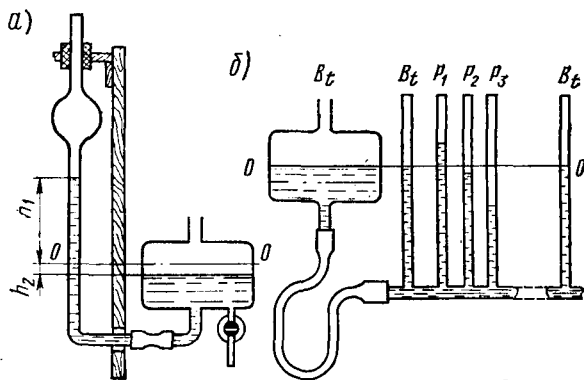


Рис. VI. 2. Жидкостные манометры:
 B_t — атмосферное давление

Под действием разрежения жидкость (чаще всего вода) в мерной трубке поднимается, а уровень ее в резервуаре соответственно опускается, причем

$$f_1 h_1 = F_2 h_2,$$

где f_1 и F_2 — площади сечения пьезометрической трубки или трубок и резервуара. Соотношение между f_1 и F_2 подбирают так, чтобы понижение уровня в резервуаре составляло менее 1% от показаний пьезометра и им можно было пренебречь. Для этого внутренние диаметры D резервуара и d трубок выбирают из условия $d \approx 0,1 D$. Погрешности измерений уменьшатся, если еще увеличить D или уменьшить d . Однако последнее нежелательно, поскольку с уменьшением d возрастает влияние явления капиллярности на точность измерений вследствие того, что приращение Δh (мм) высоты H подъема жидкости в трубках связано с поверхностным натяжением $\delta_{\text{ж}}$ и величинами d и $\rho_{\text{ж}}$ известной зависимостью:

$$\Delta h = 4\delta_{\text{ж}} / (d\rho_{\text{ж}}g)^*.$$

В пьезометре, представленном на рис. VI.2, а, уровень жидкости на нулевую отметку отсчетной шкалы устанавливают с помощью краника, впаянного в дно резервуара. Его пьезометрическая трубка снабжена небольшой колбочкой, выполняющей роль демфера, сглаживающего колебания измеряемого давления, которое возникает при

* Для ртути при диаметре трубки $d > 8$ мм и высоте мениска не более 2 мм поправка соответствует около 1 мм рт. ст.; при высоте мениска 1 мм — около 0,4 мм [12].

пульсирующем движении потоков (во впускном тракте двигателя и др.). Вместе с тем колбочка служит препятствием возможному аварийному высасыванию жидкости из пьезометра при резком внезапном увеличении разрежения сверх расчетного.

Пьезометры, выполненные по описанной схеме, позволяют вести отсчеты более точно, чем U-образные, и могут быть как одиночными, так и батарейного типа с количеством пьезометрических трубок, равным числу мест замера.

На рис. VI.2, б показана схема батарейного пьезометра с резервуаром, перемещаемым по вертикали в нужное положение. Батарея пьезометрических трубок с помощью гибкого резинового или иного шланга подсоединена к резервуару параллельно. Благодаря имеющейся возможности изменения отсчетного уровня такой пьезометр, как и U-образный, позволяет измерять не только разрежения, но и небольшие избыточные давления, причем одновременно, если резервуар установить в среднее положение относительно трубок, как показано на рисунке. В таких пьезометрах две крайние трубки обычно соединяют с атмосферой, используя их для контроля уровня. Остальные трубки служат для определения измеряемых давлений $p_1, p_2, p_3, \dots$.

При необходимости повысить компактность пьезометрического щита, вместо батарейного применяют одиночный пьезометр, который с помощью кранов-переключателей КП-3 (на три позиции) или КП-6 (шесть позиций) поочередно соединяют с местом замера [31].

Высоту трубок и рабочую жидкость для пьезометров выбирают в зависимости от предполагаемого диапазона измеряемых давлений.

Таблица VI.1

Название жидкости	Химическая формула	Свойства при $+20^\circ \text{C}$		Примечание
		плотность, г/см^3	коэффициент объемного расширения $\beta \cdot 10^3, 1/^\circ\text{град}$	
Ртуть	Hg	13,546	0,18	Ядовита, сильно действует на медь, алюминий, оловянный припой
Бензол	C_6H_6	0,878	1,25	Горюч
Нитробензол . . .	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	1,205	0,82	Ядовит и горюч
Толуол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	0,886	1,07	Горюч
Спирт метиловый	CH_3OH	0,792	1,19	Ядовит и горюч
Эфир этиловый . .	$\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$	0,710	1,63	Горюч
Четыреххлористый углерод	CCl_4	1,595	1,22	Ядовит, разрушает резиновые трубки
Хлороформ	CHCl_3	1,489	1,27	
Спирт этиловый . .	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{вода}$	$\approx 0,80$	1,08	
Вода дистиллированная	H_2O	1,0 при $t = +4^\circ \text{C}$	0,21	

На практике чаще всего применяют пьезометрические трубки длиной 800—1000 мм и по условиям прочности не более 1500 мм, если рабочей жидкостью служит ртуть. Только в отдельных случаях при измерении, например, разрежений в диффузоре карбюратора в мм вод. ст. длина трубок достигает 2000 мм. Для пьезометров применяют жидкости, обладающие небольшой величиной капиллярности, малым коэффициентом теплового расширения, незначительной вязкостью и неизменностью плотности при испарении. Некоторые из таких жидкостей приведены в табл. VI.1.

Шкалу жидкостных манометров, как правило, размечают в миллиметрах, а в качестве рабочих жидкостей в лабораториях автомобильных и тракторных двигателей обычно применяют спирт, воду и ртуть. Последнюю используют, например, в пьезометрах, подключаемых в задрессельное пространство впускного тракта карбюраторных двигателей, где разрежения достигают 6000 мм вод. ст. При необходимости пересчета показаний пьезометра из линейных единиц в единицы давления учитывают, что в условиях нормального ускорения силы тяжести $1 \text{ кгс/см}^2 = 735,55 \text{ мм Hg} = 10\,000 \text{ мм H}_2\text{O} = 10\,000 \text{ кгс/м}^2 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$, или, соответственно, при 0°C для ртути и 4°C для воды $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,322 \text{ Н/м}^2$, $1 \text{ мм вод. ст.} = 9,80665 \text{ Н/м}^2$ и $1 \text{ мм рт. ст.} = 13,6 \text{ мм вод. ст.}$ Показания водяных пьезометров в мм вод. ст. обычно подставляют непосредственно в расчетные уравнения, поскольку численно $1 \text{ мм вод. ст.} = 1 \text{ кгс/м}^2$.

Точность измерений с помощью жидкостных манометров достигает $\pm 0,5\%$, тогда как точность мановакуумметров в среднем составляет $\pm 1\%$. Поэтому последние рекомендуют применять только для типовых испытаний. При выполнении измерений повышенной точности надлежит особо учитывать капиллярные свойства жидкости и поэтому не применять для пьезометров некалиброванные стеклянные трубки с малым внутренним диаметром. Желательно, чтобы трубки в свету имели $6 \div 8 \text{ мм}$.

§ VI. 3. Микроманометры

Для повышения чувствительности пьезометров при измерениях очень малых разрежений, давлений или перепадов давлений применяют жидкостные манометры с наклонной пьезометрической трубкой,

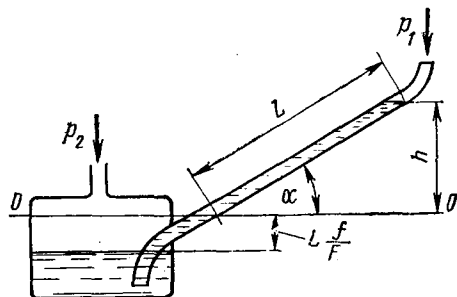


Рис. VI. 3. Принципиальная схема микроманометра

называемые *микроманометрами*. В принципе это манометры чашечного типа, построенные по схеме, изображенной на рис. VI.3. Основу их составляют герметичный резервуар с относительно большим поперечным сечением и соединенная с ним пьезометрическая трубка, наклон которой можно изменить.

Если L — величина линейного перемещения сере-

дины мениска рабочей жидкости в трубке, наклоненной к горизонту под углом α , то соответствующее этому вертикальное перемещение столба жидкости относительно исходной нулевой отметки будет

$$h = L \sin \alpha.$$

Но так как относительно той же исходной нулевой отметки жидкость в резервуаре опустится на величину $L (f/F)$, где f и F — пло-

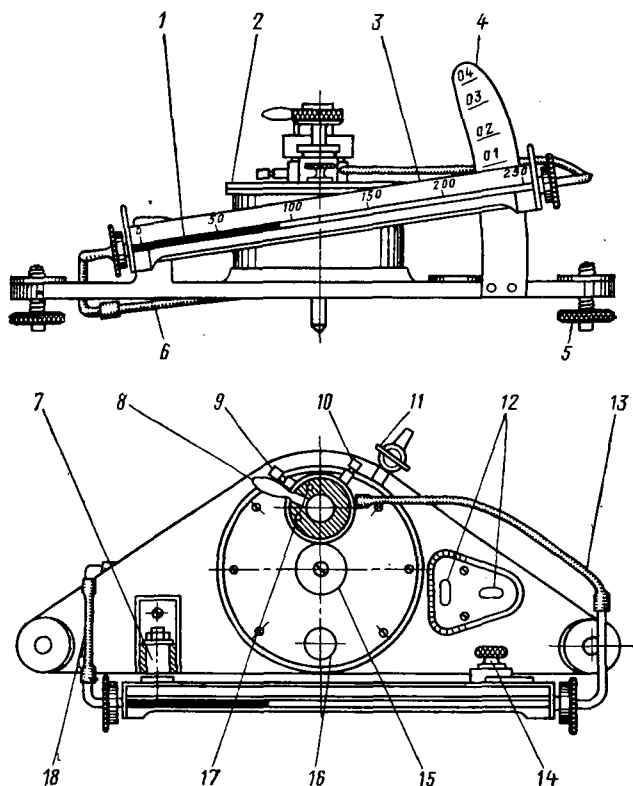


Рис. VI. 4. Микроманометр:

1 — пьезометрическая трубка; 2 — резервуар; 3 — шкала отсчета; 4 — сектор; 5 — винтовые опоры; 6, 13, 18 — трубки соединительные; 7 — ось; 8 — кран; 9, 10 — присоединительные штуцера; 11 — краник слива; 12 — уровни; 14 — винт фиксации трубки 1; 15 — головка стержня вытеснителя; 16 — пробочка заливного отверстия; 17 — ограничительные штифты для установки крана 8

щади сечения соответственно трубки и резервуара, то полный перепад уровней сложится из суммы двух перепадов:

$$H = h + L (f/F) = L [\sin \alpha + (f/F)].$$

Положим далее, что линейное перемещение мениска жидкости в трубке на величину L произошло в результате подключения прибора

к двум местам замера, давление в которых составляло p_1 и p_2 , причем $p_2 < p_1$. Тогда перепад давлений между точками замера

$$\Delta p = p_1 - p_2 = L \rho_{\text{ж}} g [\sin \alpha + (f/F)],$$

где $\rho_{\text{ж}}$ — плотность рабочей жидкости.

Допустим, l — величина деления шкалы прибора, тогда число делений, отсчитываемое в результате перемещения середины мениска жидкости на величину L , составит $n = L/l$. Но так как отсчетную шкалу микроманометров размечают на деления, равные 1 мм, то перепад давлений можно выразить так:

$$\Delta p = n \rho_{\text{ж}} g (\sin \alpha + f/F) = kn,$$

где k — коэффициент, учитывающий размеры площадей сечения резервуара и трубки, плотность рабочей жидкости (точнее, спирта) и угол наклона трубки.

Таким образом, для определения показаний прибора достаточно число делений, найденное по его отсчетной шкале, умножить на коэффициент k , который постоянен для данного угла α наклона трубки. Чтобы облегчить измерения, на секторе, по которому перемещают державку наклонной трубки, наносят отметки, соответствующие величинам коэффициента $k = 0,1; 0,2; 0,3$ и т. д. Вполне очевидно, что с уменьшением k цена деления шкалы уменьшается, вследствие чего чувствительность прибора повышается.

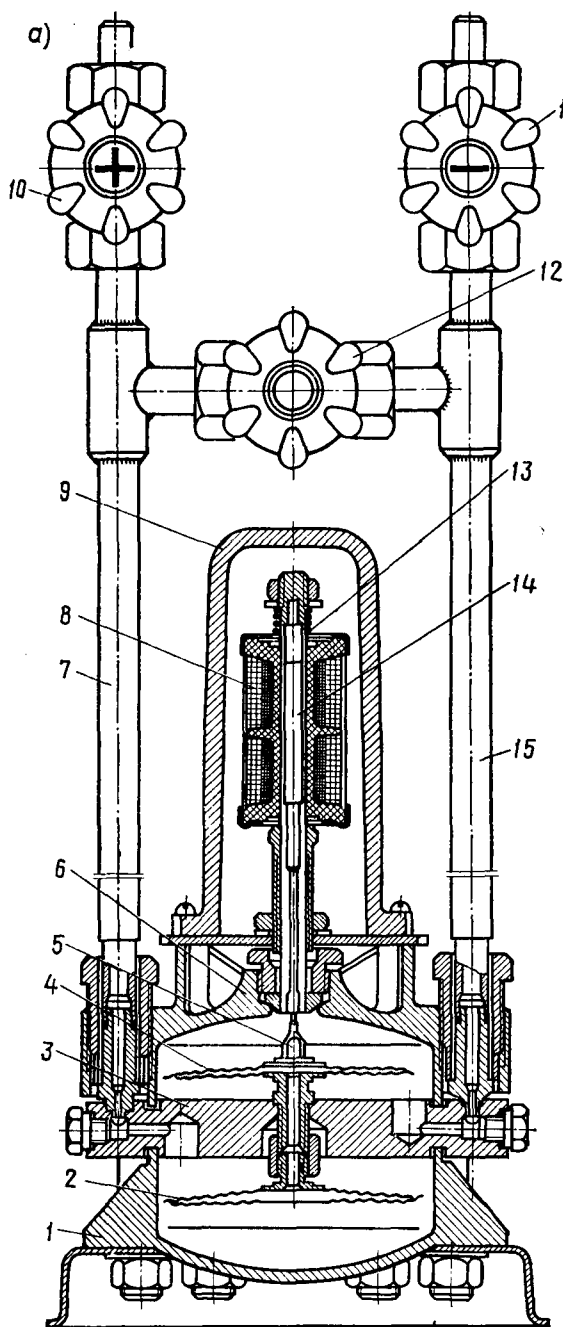
Конструкция широко известного микроманометра промышленного изготовления, работающего по описанному принципу, показана на рис. VI.4.

§ VI. 4. Дифференциальные электромеханические манометры

В практике измерения давлений широко применяют так называемые дифманометры и мановакуумметры мембранные, сифонные и поплавковые с электрической системой передачи, показывающие и самопишущие. Манометры этого типа обеспечивают дистанционное измерение разности давлений, разрежений (вакуумметрического давления) и избыточного давления жидкости, газа и пара при условии, что измеряемые среды неагрессивны по отношению к кадмированным углеродистым сталям и красной меди.

На рис. VI.5, а приведен мембранный дифманометр типа ДМ модели 3564, предназначенный для преобразования величины измеряемой разности давлений (перепада) в электрический сигнал, поступающий на регистрирующий прибор дифференциально-трансформаторной схемы (рис. VI.5, б).

Чувствительным элементом прибора является мембранный блок, состоящий из двух мембранных коробок 2 и 4, встраиваемых с двух сторон в подушку 3 между крышками 1 и 6, которые образуют две камеры: плюсовую (нижнюю) и минусовую (верхнюю). Полости коробок объединены между собой отверстием в подушке и заполнены дистиллированной водой через ниппель, на который навертывают



гайку 5 сердечника 14 дифференциального трансформатора 8. Сердечник заключен в разделительную трубку 13, а весь трансформатор закрывают колпаком 9.

Давления в полости подводят через трубки 7 и 15, перекрываемые запорными 10 и 11 и уравнительным 12 вентилями. Последние помечены, соответственно, знаками «+», «—» и «0». Под действием разности давлений в плюсовой и минусовой камерах нижняя мембранная коробка сжимается, вследствие чего жидкость перетекает в верхнюю коробку и вызывает перемещение сердечника 14 трансформатора 8.

Электрическая часть прибора содержит первичную I и вторичную II обмотки трансформатора и манганиновое сопротивление R2, соединенные между собой по схеме, изображенной на рис. VI.5, б и имеющие выход к регистри-

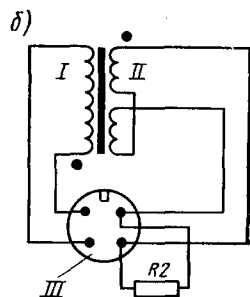


Рис. VI. 5. Дифманометр типа ДМ (а) и его электрическая схема (б)

рующему устройству (указателю) через кабельный разъем III. В результате перемещения сердечника 14 в измерительной цепи возникают электрические сигналы, приводящие в действие стрелки указателей, самописцы, сигнализацию, использующиеся для автоматического регулирования систем.

Приборы ДМ позволяют фиксировать перепады давлений до $160 \div 2500$ мм вод. ст. и до $0,4 \div 8$ кгс/см². Нормальными для них являются температуры $+5 \div +50^\circ$ С при относительной влажности не более 80%.

§ VI. 5. Пружинные манометры

Манометры этого типа основаны на использовании деформации различного рода упругих элементов. Они отличаются портативностью и большими диапазонами измеряемых величин.

В лабораторной практике обычно применяют манометры с трубчатой пружиной, называемой трубкой Бурдона. Эллиптическое; или овальное, сечение такой трубки под действием давления во внутренней ее полости стремится стать круглым, а сама трубка, согнутая в кольцо, несколько распрямляется. Перемещение свободного конца трубки с помощью рычажного механизма передается к стрелке указателя, угол поворота которой пропорционален величине измеряемого давления.

Пружинные манометры, рассчитанные на измерение давлений до $5 \div 8$ кгс/см² ($0,5 \div 0,8$ МН/м²), служат для контроля за правильной работой систем смазки и топливоподачи двигателей. Точность этих манометров не лимитирует их выбор. Манометры на давления до $100 \div 300$ кгс/см² ($10 \div 30$ МН/м²) применяют для проверки и настройки датчиков высокого давления, форсунок и насосов дизелей и т. д.

Для проверочных и настроечных работ целесообразно использовать контрольные манометры. Такие манометры часто имеют две трубчатые пружины, впаянные в общий держатель, и, соответственно, два стрелочных механизма с общей или раздельными шкалами отсчета показаний. Если при работе обе стрелки показывают величины, одинаковые или отличающиеся друг от друга в пределах допускаемой погрешности манометра, то он исправен. При показаниях стрелок, расходящихся на величину больше допускаемой, манометр не исправен и подлежит замене. Этот метод самоконтроля базируется на том, что вероятность одинакового повреждения механизмов ничтожно мала, вследствие чего они не могут случайно изменить свои показания в одинаковой мере.

Точность обычных технических манометров составляет $\pm 1,5 \div 4\%$; контрольных $\pm 0,5 \div 1,0\%$. Образцовые манометры обладают точностью $0,16 \div 0,45\%$ и служат эталонами.

§ VI. 6. Барометры

Давление в окружающей среде при испытании двигателей служит уровнем, с которым сравнивают давления в исследуемых потоках жидкостей и газов, а также является исходной величиной для приве-

дения полученных показателей к стандартным условиям. Измерение окружающего атмосферного давления по ГОСТу должно проводиться в помещении для испытаний с точностью ± 1 мм рт. ст. Этим условиям отвечают жидкостные ртутные барометры и некоторые пружинные барометры-анероиды.

При типовых испытаниях двигателей часто используют барометры-анероиды. Так, анероид типа МД-49-2 имеет шкалу с ценой деления 1 мм рт. ст., проградуированную от 600 до 790 мм. Погрешности ртутных барометров не превышают $\pm 0,8$ мм рт. ст. при изменении температуры в диапазоне от -10 до $+50^\circ\text{C}$.

Для измерений при исследовательских работах обязательно применяют чашечные ртутные барометры. Такой прибор типа МД-21 рассчитан на пределы давлений 810—1080 мбар, т. е. примерно на $608 \div 810$ мм рт. ст.*. Точность его показаний достигает 0,1 мм рт. ст. и удовлетворяет самым жестким требованиям.

Барометры в значительно большей мере, чем манометры, следует оберегать от сотрясений и толчков и держать в футлярах, ртутные — вертикально в подвешенном положении, анероиды — горизонтально на пружинных растяжках.

§ VI. 7. Погрешности манометров

Ответственные измерения при исследовательских испытаниях двигателей обычно делают жидкостными манометрами. Характерная особенность их заключается в полном отсутствии каких-либо подвижных звеньев или элементов конструкции. Это выгодно отличает жидкостные манометры от пружинных приборов. И с точки зрения точности измерений они служат для последних образцовыми.

Наиболее простыми являются U-образные жидкостные манометры, но им также присущи все разновидности основных и дополнительных погрешностей.

Основные инструментальные погрешности — результаты неточности изготовления, градуировки и установки шкал, отсчетных устройств и стеклянных трубок.

Дополнительные погрешности возникают вследствие изменения температуры окружающей среды, отклонение которой от стандартной связано с изменением линейных размеров шкалы и трубок, объема и плотности рабочей жидкости.

Стандартными температурными условиями работы для манометров являются условия, принятые для их тарирования, т. е. $+20^\circ\text{C}$. Поэтому показания жидкостных манометров, если они получены при температуре, отличной от $+20^\circ\text{C}$, необходимо приводить к стандартным условиям. Поправку к показаниям определяют, учитывая, что величина абсолютной дополнительной температурной погрешности

$$\Delta H = (\Delta V_{\text{ж}} - \Delta V_{\text{с}}) / f_{\text{тр}},$$

где $\Delta V_{\text{ж}}$ и $\Delta V_{\text{с}}$ — приращения объемов жидкости и сосуда, м^3 ; $f_{\text{тр}}$ — сечение трубки, м^2 .

* 1 мбар = 0,75 мм рт. ст.

Используя известные соотношения температурного расширения сосуда и жидкости,

$$\Delta H = H_t \cdot \Delta t (\beta - 3\alpha) / (1 + \alpha \cdot \Delta t)^2 \approx H_t \cdot \Delta t (\beta - 3\alpha) / (1 + 2\alpha \cdot \Delta t),$$

где H_t — показание прибора при температуре опыта, $t^\circ\text{C}$; $\Delta t = t - 20^\circ\text{C}$ — приращение температуры сравнительно с стандартной; β и α — температурные коэффициенты объемного расширения жидкости и линейного расширения материала сосуда, град^{-1} .

Тогда показание прибора, приведенное к стандартным условиям,

$$H_0 = H_t - \Delta H = H_t \left[1 - \frac{\Delta t (\beta - 3\alpha)}{1 + 2\alpha \cdot \Delta t} \right],$$

или окончательно

$$H_0 = H_t \frac{1 + \Delta t (5\alpha - \beta)}{1 + 2\alpha \cdot \Delta t} = H_t \Delta.$$

Учитывая значение коэффициента линейного расширения материала трубок — стекла, для которого $\alpha = 0,00001 \text{ град}^{-1}$, и коэффициенты объемного расширения основных рабочих жидкостей манометров — ртути, воды и этилового спирта, для которых β при температуре 20°C , соответственно, будет $0,000181$; $0,0021$ и $0,0011 \text{ град}^{-1}$, поправочный множитель можно представить в виде, более удобном для пользования:

для ртути $\Delta = (1 - 0,000131 \Delta t) / (1 + 0,00002 \Delta t)$,

для воды $\Delta = (1 - 0,00205 \Delta t) / (1 + 0,00002 \Delta t)$,

для этилового спирта $\Delta = (1 - 0,00105 \Delta t) / (1 + 0,00002 \Delta t)$.

Определение погрешности пружинных манометров путем расчета затруднено тем, что с течением времени и в результате пользования ими отдельные детали манометров могут изменять свою форму, размеры, упругие и другие свойства. Вместе с этим изменяются и величины погрешностей. Поэтому перед началом испытаний показания пружинных манометров для ответственных установок следует сравнить с показаниями заведомо точных эталонных манометров, руководствуясь правилами, утвержденными Комитетом стандартов, мер и измерительных приборов при СМ СССР [68].

Допустимые погрешности для рабочих манометров приведены в табл. VI.2.

Таблица VI.2

Предельное давление по шкале манометра, кгс/см ²	Допустимая погрешность по всей шкале, кгс/см ²	Предельное давление по шкале манометра, кгс/см ²	Допустимая погрешность по всей шкале, кгс/см ²
0,5	0,02	20	0,30
1,0	0,04	25	0,35
3,0	0,05	30	0,40
6	0,10	40	0,45
8	0,15	50	0,5
12	0,20	Свыше 50	1% от наибольшего значения шкалы
16	0,25		

§ VI.8. Измерение давлений в потоках

Для потоков жидкостей и газов определяющее значение имеет не только статическое давление, именуемое чаще всего просто давлением, но также полные и динамические давления, обусловливаемые скоростным напором потока. Измеряемым параметром является и

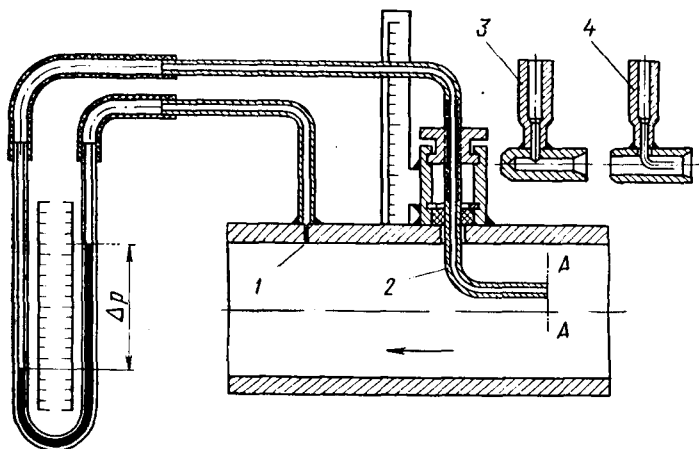


Рис. VI.6. Приемники измерения полного и статического давлений

← — направление движения потока

направление движения потока в данной исследуемой полости, если оно заранее не было известно.

Статическим принято называть давление, возникающее на поверхности достаточно малого тела, движущегося с потоком или, как отмечалось ранее, давление потока на стенку, вдоль которой он движется. Поэтому статическое давление, т. е. величину давления p в потоке, можно измерять через отверстие 1 в стенке по схеме, показанной на рис. VI.6, если соблюдены условия выполнения приемного отверстия, оговоренные в § VI.1.

Полным называют давление p_n , которое испытывает неподвижное тело, помещенное в движущийся поток, в той его точке (или точках), где скорость набегающего потока затормаживается до нуля. Имея в виду, что торможение струек газа, не ограниченных твердыми стенками, происходит практически по адиабате и без потерь полного давления, величина этого давления в простейшем случае может быть измерена открытой трубкой 2, устанавливаемой против потока (рис. VI.6).

Согласно уравнению Бернулли, полное давление в сечении А—А, т. е. на входе в приемник полного давления, отнесенное к массе 1 кг,

$$p_n = \rho (w^2/2) + p,$$

где w — скорость невозмущенного потока в месте замера; ρ — плотность газа; p — статическое давление в потоке.

Очевидно, динамическое давление потока, или скоростной напор его, определяет разность

$$p_n - p = \rho (w^2/2) = \Delta p,$$

которую легко измерить, если приемники давлений p_n и p подключить к U-образному манометру по схеме, изображенной на рис. VI.6.

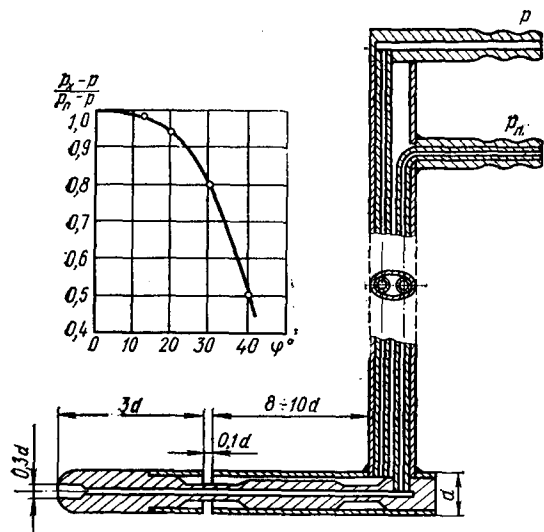


Рис. VI. 7. Пневмометрическая комбинированная трубка

Размеры и форма приемных трубок не оказывают влияния на величину полного давления, но поскольку большемерные приемники загромождают каналы, то стремятся применять микротрубки с диаметром не более 2—3 мм. При этом учитывают, что простейшие приемники полного давления воспринимают истинное полное давление только тогда, когда ось приемной трубки совпадает с направлением движения потока. Это осложняет их практическое использование, особенно в каналах, где трудно пра-

вильно ориентировать приемник относительно потока. В таких случаях целесообразно применять приемники с раззенкованной на $60-90^\circ$ входной частью или приемники с протоком (см. позиции 3 и 4 на рис. VI.6). Приемники с раззенкованной входной частью обеспечивают удовлетворительные показания при скосах потока $20-30^\circ$, а проточные позволяют фиксировать полные давления с точностью 1% при скосах потока, достигающих $45-55^\circ$.

На практике испытания двигателей чаще всего применяют, однако, комбинированные пневмометрические трубки типа Пито — Прандтля. Трубки этого типа нормализованы, поэтому их можно использовать без предварительной тарировки, если они выполнены с соотношениями размеров, показанными на рис. VI.7. На рисунке представлена также диаграмма, характеризующая влияние угла φ° скоса потока на показания p_x приемника полного давления [14]. Комбинированный приемник давлений, или пневмометрическая трубка, имеет два концентрически расположенных канала и согнута под прямым углом, поэтому устье ее центрального канала легко направить против потока. Приемная часть трубки (носик) выполнена полусферической, и набегающие струйки воздуха (газа) только незначительно отклоняются

от нее на небольшом участке длиной $\approx 3d$ от носка, а потом снова движутся параллельно оси трубки, и давление на ее поверхность становится равным статическому. В этой зоне трубки сверлят несколько маленьких отверстий или делают небольшую кольцевую щель, через которую периферийный канал трубки открывается в поток. Центральный и периферийные каналы имеют отдельные выводы к дифференциальному манометру, позволяющему при необходимости наблюдать нужные давления или их разницу.

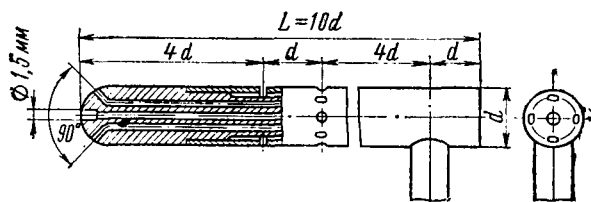


Рис. VI.8. Шеститочечный приемник давлений ЦАГИ

Строго говоря, регистрируемая разница давлений характеризует не одно, а два сечения, но расстояние между ними очень мало и практически не оказывает влияния на точность измерений.

Знание полных давлений или скоростных напоров необходимо для определения потерь в исследуемых потоках и выявления истинного направления их течения. Однако обследование пространственных потоков, например во внутренних полостях двигателя, часто затруднено тем, что нельзя с уверенностью судить о направлении движения в них потока. В таких случаях применяют пневмометрические трубки с несколькими приемными отверстиями, направленными навстречу предполагаемому направлению потока. Широко используют, например, шеститочечный приемник ЦАГИ, показанный на рис. VI.8. Центральная трубка имеет в нем прямой срез и является приемником полного давления, если приемник правильно сориентирован, а симметрично расположенные относительно центральной трубки еще четыре трубки срезаны под некоторым углом и служат для измерения скаса потока в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Добываясь равенства напора в трубках на скосах приемника, находят направление движения потока. Приемник давлений ЦАГИ универсален. Одновременно с выявлением направления движения потока он позволяет измерять полное давление через центральную трубку и статическое давление через боковое (шестое) отверстие (точнее через серию отверстий, состоящую из двух рядов отверстий на его боковой поверхности).

На практике применяют также шаровидные многоточечные приемники полного давления с диаметром шаровой головки $3 \div 10$ мм и приемными отверстиями $0,3 \div 1$ мм. При необходимости приемники полного и статического давлений выполняют в виде гребенок с нужным количеством точек замера, применяемых для выявления полных давлений в исследуемом сечении канала (трубопровода) в связи с неравно-

мерностью распределения скоростей отдельных струек потока по его сечению, зависящему от характера или режима движения, которое может быть ламинарным и турбулентным [49, 50].

Ламинарное движение наблюдается при сравнительно малых скоростях или значительной вязкости жидкости, когда среда движется параллельными струйками a , как показано на рис. VI.9, причем скорость каждой из них постоянна и направлена вдоль оси потока. Однако по сечению трубы скорости частиц изменяются по

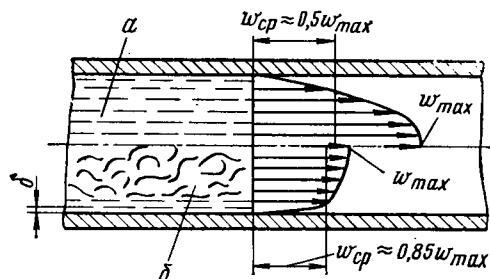


Рис. VI.9. Эпюры распределения скоростей по сечению канала при ламинарном (а) и турбулентном (б) движениях потока

параболе: от нуля у стенок трубы до максимума на ее оси, вследствие чего средняя скорость $w_{cp} \approx 0,5 w_{max}$.

Турбулентное движение возникает при больших скоростях и характеризуется тем, что частицы вещества перемещаются в различных направлениях по пересекающимся путям. Вследствие этого движение приобретает беспорядочный характер и в любой точке потока

происходят так называемые пульсации скорости, т. е. быстрые изменения скорости по времени. Но мгновенные значения скоростей колеблются вокруг некоторой средней величины, поэтому эпюры скоростей и полных давлений приобретают вид б, показанный на рис. VI.9. Только у стенок трубы в очень тонком граничном слое толщиной δ в рассматриваемом случае движение носит ламинарный характер. Его называют *ламинарным пограничным слоем*. В основном потоке распределение скоростей значительно равномернее ламинарного и средняя скорость $w_{cp} \approx 0,85 w_{max}$.

Переход от одного режима движения к другому происходит, как известно, при определенном значении числа Рейнольдса, называемого *критическим*. Для прямолинейных труб (каналов) значение его составляет примерно 2300. При $Re < 2300$ — движение устойчивое ламинарное, при $Re > 2300$ — турбулентное. Однако ламинарное движение наблюдается сравнительно далеко от входа в трубу, куда не доходят вихри, возникающие на входе (см. гл. VIII). Заметим также, что при определении числа Re для каналов некруглого сечения вместо диаметра в расчетах учитывают величину эквивалентного диаметра, называемого также гидравлическим диаметром:

$$d_r = 4F/P,$$

где F — площадь сечения потока; P — периметр, смачиваемый жидкостью.

Таким образом, независимо от характера движения измеренные величины полного давления соответствуют местной скорости потока в той точке, где установлен приемник давления.

ГЛАВА VII

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

§ VII.1 Общие сведения

Определение температуры тела особенно сложный и трудоемкий процесс измерения, основанный на теплообмене между телами и на изменении физических свойств тел при нагреве. Чтобы определить степень нагретости тела, его вводят в тепловой контакт с другим телом, называемым *термометром*, по показаниям которого судят о тепловом состоянии изучаемого тела, или же сопоставляют его нагретость с нагретостью термометрического вещества бесконтактным способом.

Для измерения температуры применяют различные указывающие и регистрирующие приборы — термометры местного и дистанционного контроля температуры, если необходимо, с сигнализацией предельных ее значений.

По принципу действия термометры, так же как и приборы давления, разделяют на механические, электромеханические и электрические. В каждую группу входят свои разновидности термометров с общими характерными особенностями термометрического вещества.

К **м е х а н и ч е с к и м** относят термометры, действие которых основано на тепловом расширении твердых и жидких тел, на изменении давления газов или жидкости и ее паров в замкнутых системах, вызывающих механическое перемещение или изменяющих давление, преобразуемое в механическое перемещение, пропорциональное нагреву. Наиболее распространены из этой группы жидкостные и манометрические термометры.

К **э л е к т р о м е х а н и ч е с к и м** и **э л е к т р и ч е с к и м** относят разнообразные термометры сопротивления, в которых используют свойства проводниковых и полупроводниковых термосопротивлений, термометры с полупроводниковыми диодами и триодами в качестве чувствительных элементов, а также термоэлектрические термометры, позволяющие измерять тепловое состояние среды по изменению термоэлектродвижущей силы в термометрической паре проводников. Из названных разновидностей термометров чаще всего применяют электрические.

При испытании двигателей термометры используют значительно шире приборов давления. Без тщательного измерения температур окружающей среды, теплового состояния двигателя и расходующих материалов нельзя получить достоверных результатов, сравнить одни

испытания с другими и т. д. Выбор нужного для этого типа термометра определяется назначением, необходимой точностью измерений и пределами температур в планируемой зоне измерения.

Так, жидкостные термометры расширения применяют для измерения температуры окружающей среды теплового состояния потоков воздуха и жидкостей в трубопроводах и для контроля других приборов измерения температур; термометры давления или манометрические термометры — для измерения температуры охлаждающей жидкости и картерного масла двигателя; термометры сопротивления — для измерения температуры воды, воздуха, картерного масла, топлива и т. д., термоэлектрические термометры — для измерения температуры отработавших газов, тепловой напряженности деталей двигателя и других горячих объектов.

Отечественные приборы для измерения температуры размечают в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$), являющихся единицей температуры международной практической температурной шкалы, реже — в электрических единицах измерения, которые переводят потом в градусы по тарировочным графикам.

В системе СИ за единицу температуры также принят градус (град.). При этом в зависимости от начальной точки отсчета различают абсолютную температуру, отсчитываемую в градусах Кельвина (T, K) от абсолютного нуля, и температуру по практической стоградусной шкале в градусах Цельсия ($t, ^{\circ}\text{C}$), отсчитываемую от точки плавления льда. По этой шкале 100°C соответствуют точке кипения воды при нормальном атмосферном давлении (760 мм рт. ст.).

Абсолютная температура представляет собой термодинамический параметр и согласно второму началу термодинамики определяется независимо от свойств какого-либо вещества. Термодинамическая шкала, или шкала Кельвина, совпадает со шкалой газового термометра, заполненного идеальным газом, по которой для давления 760 мм рт. ст. принимают точку кипения воды за 100°C , а точку плавления льда — за 0°C Международной практической стоградусной шкалы.

По Кельвину абсолютная шкала определяет степень отклонения теплового состояния системы от ее состояния при абсолютном нуле. Между температурами абсолютной и замеренной по стоградусной шкале существует зависимость:

$$TK = (t + 273,16)^{\circ}\text{C}.$$

Кроме абсолютной и стоградусной шкалы существуют шкала Реомюра, Фаренгейта и другие, скорректированные по шкале газового термометра. По шкале Реомюра промежуток между точками плавления льда и кипения воды разделяют на 80 частей. По шкале Фаренгейта плавление льда происходит при 32° , а кипение воды — при 212°F .

Термометры со шкалой Фаренгейта до сих пор широко применяют в Англии и США.

При пересчете градусов шкалы Фаренгейта в градусы стоградусной шкалы следует пользоваться такими соотношениями между ними:

$$n^{\circ}\text{C} = (1,8n + 32)^{\circ}\text{F}$$

или

$$n^{\circ}\text{F} = (n - 32)/1,8^{\circ}\text{C}.$$

§ VII.2. Жидкостные термометры

Работа жидкостных термометров расширения основана на неодинаковом расширении при нагреве их оболочки и находящейся в ней жидкости. Такие термометры относятся к однозвенным приборам и состоят из прозрачного баллончика с припаянной к нему капиллярной трубкой и шкалы, которую часто наносят непосредственно на капиллярную трубку.

Поскольку коэффициент расширения различных жидкостей термометров в 15—30 раз больше коэффициента расширения оболочки (стекла или кварца), то приращение температуры Δt преобразуется в перемещение мениска жидкости в капиллярной трубке, и определяется статической характеристикой прибора [68]:

$$\Delta l = L_0(\beta - 3\alpha) \Delta t / (1 + \alpha \cdot \Delta t)^2,$$

где L_0 — начальная длина капиллярной трубки; β и α — коэффициенты объемного и линейного расширения жидкости и оболочки термометра, град $^{-1}$.

Приведенная зависимость нелинейна, вследствие чего при равномерной градуировке шкалы термометра возникают шкальные погрешности. Однако величина их незначительна.

Оболочку и капиллярные трубки жидкостных термометров изготовляют из стекла ($\alpha = 0,00001$ град $^{-1}$) или кварца, а жидкостями для них обычно служат ртуть и спирт, реже толуол и пентан. Наиболее распространены ртутные приборы.

Шкалы обычных ртутных стеклянных термометров ограничиваются пределами -39°C (точка замерзания ртути) и $+357^{\circ}\text{C}$ (точка ее кипения). Чтобы поднять верхний предел шкалы, точку кипения ртути повышают путем заполнения пространства над ней очищенным азотом, который вводят под большим давлением. Так, при давлении азота около 100 кгс/см 2 (≈ 10 МН/м 2) верхний предел измерения ртутным термометром повышается до 550°C . Далее наступает размягчение и плавление обычного стекла. Однако применение кварцевого стекла позволяет поднять температурный интервал измерений до $+650^{\circ}\text{C}$ и выше.

В технике измерений ртутные термометры широко применяют при измерениях жидких и газообразных сред до 500°C . При необходимости измерения более высоких температур внутрь кварцевой оболочки вводят легкоплавкий металл галлий, который плавится при 30°C и кипит при 1700°C . Такие кварцево-галлиевые термометры позволяют измерять температуру до $1000-1200^{\circ}\text{C}$.

Температуру ниже -15°C рекомендуется измерять спиртовыми термометрами и термометрами, заполненными толуолом или пентаном, поскольку ртуть при этом становится вязкой и искажает результаты измерений. Нижний предел, доступный измерению жидкостными термометрами, равен примерно -40°C для спиртовых, -80°C при использовании толуола и -200°C в случае заполнения их пентаном.

Жидкостные термометры разделяют на технические и лабораторные.

Лабораторные варианты выпускают с ценой деления шкалы $0,5^{\circ}\text{C}$ и менее. Наиболее точные из них имеют цену деления $0,1-0,2^{\circ}\text{C}$. Такие термометры рекомендуется применять, например, для определения теплоотдачи в воду и масло при снятии теплового баланса двигателя. В обычных исследовательских испытаниях двигателей для измерения температуры воды, масла и температуры в потоках широко применяют термометры типа УНП, относящиеся к категории так называемых палочных. Они имеют цену делений $0,5^{\circ}\text{C}$ и укороченную шкалу с диапазонами температур: $0 \div 50$, $20 \div 70$, $40 \div 80$, $50 \div 150$, $80 \div 120$, $130 \div 170^{\circ}\text{C}$.

Технические варианты выпускают со шкалой, размеченной по $1,0^{\circ}\text{C}$ и более (до 10°C). При измерении ими допускается значительное выступание столбика жидкости над измеряемой средой. Большое количество этих термометров выпускают с более тонкой погружаемой или «хвостовой» частью. Иногда погружаемую часть их выполняют колеснообразной с углами 90 , 120° и др.

При точных измерениях термометры полагается погружать так, чтобы столбик жидкости термометра был полностью погружен в измеряемую среду или мениск столбика жидкости выступал над поверхностью не более, чем на $5-6$ делений шкалы. Если по каким-либо причинам этого сделать нельзя, то в показания термометра вносят поправку, учитывающую влияние источника дополнительной погрешности. Необходимость поправки вызывается тем, что стеклянные термометры в большинстве случаев градуируют при погружении в контрольную среду всего столбика жидкости, заполняющего капилляр. Поэтому точность их показаний снижается, если столбик не погружен полностью в измеряемую среду.

Поправку к показаниям термометра определяют по формулам, в которые входит множитель, учитывающий расширение и ртути, и стеклянной оболочки, причем предусматривается строгое соблюдение технологии измерения. Приводим один из применяющихся способов исправления показаний термометра [55]:

$$t_{\text{испр}} = t + 0,00016n(t - t_s),$$

где t — температура, отсчитанная по шкале данного термометра; n — число градусных делений шкалы, определяющих высоту столбика ртути, выступающего над измеряемой средой; t_s — температура средней части выступающего столбика, измеренная вспомогательным термометром.

Погрешности измерений возникают также в связи с некоторыми особенностями и неточностью изготовления термометров.

Для повышения точности измерений за счет уменьшения влияния инструментальных погрешностей термометры тарируют путем сравнения с другим, заведомо точным прибором, имеющим паспорт с поправками на показания. С этой же целью можно применять термометры, проградуированные до $0,1-0,2^{\circ}\text{C}$, если на них поставлена красная пятиконечная звездочка, свидетельствующая о повышенной точности этих экземпляров. Тарируемый и контрольный термометры погружают в водяную или масляную ванну так, чтобы столбики их жидкостей не выступали над поверхностью жидкости, в которую они погружены, причем последнюю следует непрерывно перемешивать. По полученным данным составляют таблицу поправок или строят тарировочный график.

Допустимые погрешности ртутно-стеклянных термометров приведены в табл. VII.1. Приборы, не удовлетворяющие этим требованиям, не следует применять для ответственных измерений.

Таблица VII.1

Интервал измерений, $^{\circ}\text{C}$	Допустимая погрешность термометра, $^{\circ}\text{C}$, при шкале с ценой деления, $^{\circ}\text{C}$		
	0,1; 0,2	0,5; 1; 2	5 и 10
От -30 до 0	$\pm 0,3$	± 1	—
$0-100$	$\pm 0,2$	± 1	$\pm 2,5$
$100-200$	$\pm 0,4$	± 2	± 5
$200-300$	± 1	± 3	± 10
$300-400$	—	± 4	± 10
$400-500$	—	± 5	± 10

К недостаткам жидкостных термометров относятся: невозможность дистанционных измерений и определения температуры в точке поверхности, сравнительно большая инерционность, чувствительность к ударам и вибрациям.

§ VII.3. Манометрические термометры

Термометры давления представляют собой многозвенную разновидность термометров расширения с газовым, паровым или жидкостным заполнением замкнутой системы. На рис. VII.1 показана такая система, заполненная азотом. Основой ее служит термобаллончик 1, погружаемый в измеряемую среду, трубчатая пружина 4 и герметично замыкающая их длинная капиллярная трубка 3 с внутренним диаметром, равным примерно $0,3$ мм. При нагревании баллончика 1 давление газа 2 внутри системы увеличивается, вследствие чего трубчатая пружина так же, как в любом манометре этого типа, стремится распрямиться и свободный конец ее перемещается. А так как послед-

ний через тягу 7 соединен с зубчатым сектором 8, сцепленным с ведомым колесом 5, на оси которого закреплена стрелка 6, то перемещения пружины 4 в конечном итоге вызывают отклонение стрелки 6 на угол α , пропорциональный увеличению давления в системе. Шкалу прибора градуируют в $^{\circ}\text{C}$.

Давление газа (кгс/см²) при конечной температуре t

$$p_t = p_n [1 + \beta (t - t_n)],$$

где p_n — давление газа при начальной температуре t_n , кгс/см²; $\beta = 1/273,16$ — термический коэффициент расширения газа, град⁻¹.

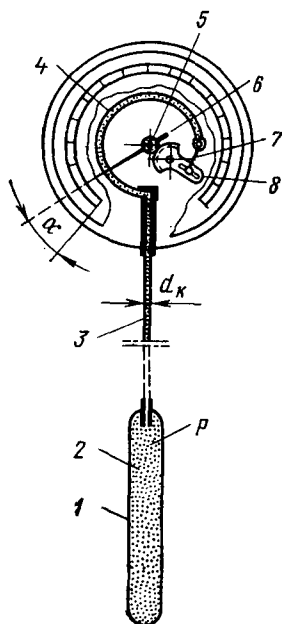


Рис. VII.1. Манометрический газовый термометр

В зависимости от вещества, заполняющего систему, термометры давления разделяют на газовые, паровые и жидкостные. Паровые и жидкостные термометры по конструкции не отличаются от газовых (см. рис. VII.1). Поэтому часто их объединяют названиями *азотермометры*, или же *дистанционные термометры*. В жидкостных термометрах давления заполняют всю систему жидкостью, физические свойства которой удовлетворяют определенным требованиям. В паровых термометрах термобаллончик заполняют примерно на 2/3 объема жидкостью, кипящей при низкой температуре, поэтому верхнюю его часть занимают пары этой жидкости. Капиллярную трубку и пружину заполняют смесью глицерина с водой или спиртом, которая не испаряется и служит для передачи давления из термобаллончика при его нагреве.

Рабочей низкокипящей жидкостью служат: хлорметил (для измерения температур $+20 \div +100^{\circ}\text{C}$), хлорэтил ($0 \div +125^{\circ}\text{C}$), этиловый эфир ($0 \div +150^{\circ}\text{C}$), ацетон ($0 \div +170^{\circ}\text{C}$), бензол ($0 \div +200^{\circ}\text{C}$). Зависимость давления насыщенных паров перечисленных жидкостей от температуры имеет нелинейный характер. Поэтому шкалу таких приборов делают неравномерной. Но поскольку давление насыщенного пара не зависит от его объема, то вследствие этого изменения температуры окружающей среды практически не оказывают влияния на показания парового термометра давления. В этом их преимущество.

Основные достоинства паровых манометрических термометров заключаются в возможности изготовления их с термобаллончиками малых габаритов, более высокой чувствительности по сравнению с термометрами давления других типов. Паровые термометры могут быть изготовлены с капиллярными трубками длиной 60 м и более, т. е. полностью решают проблему дистанционного наблюдения за тепловым состоянием двигателя.

Недостатком паровых термометров давления является неточность показаний в зоне нижнего предела температур, так как термометр в действительности показывает разницу между абсолютным давлением пара в его баллончике и атмосферным давлением. В указанной зоне эта разница невелика, поскольку давления соизмеримы.

Для жидкостных систем используют метиловый спирт (для температур $-46 \div +150^\circ \text{C}$), ксилол ($-40 \div +400^\circ \text{C}$) и ртуть ($-30 \div +550^\circ \text{C}$). Так как зависимость теплового расширения жидкостей от температуры близка к линейной, то жидкостные манометрические термометры, как и обычные жидкостные термометры, имеют равномерную шкалу. В отличие от паровых, жидкостные системы заметно реагируют на изменения температуры в окружающей среде. Изменения температуры жидкости в капиллярной трубке и в трубчатой пружине прибора изменяют общее давление в системе и приводят к искажению показаний. Поэтому жидкостные термометры снабжают различного рода компенсационными устройствами. Например, увеличивают диаметр капилляра и вводят внутрь его проволоку с малым коэффициентом температурного расширения. Благодаря этому удастся сохранять равенство приращения объемов жидкости и внутреннего пространства капилляра и, таким образом, исключить влияние последнего на показания термометра.

Газовые термометры, кроме азота, заполняют также гелием. Они пригодны для измерения температур $-130 \div +550^\circ \text{C}$, что является несомненным их преимуществом. Начальное давление газов при 0°C обычно доводят до 50 кгс/см^2 ($\approx 5 \text{ МН/м}^2$). Вследствие этого изменения окружающего давления практически не оказывают влияния на показания газовых термометров. Однако они подвержены воздействию температуры окружающей среды. Изменение температуры вызывает изменение геометрических размеров капиллярной трубки и чувствительных элементов, что служит источником дополнительных температурных погрешностей. Чтобы уменьшить их, объем термобаллончика делают значительно больше суммарного объема других рабочих элементов прибора.

Погрешности манометрических термометров с газовым заполнением составляют $\pm 1,5\%$, а с паровым и жидкостным рабочим телом — $\pm 2,0\%$ от максимального значения шкалы.

Манометрические термометры находят широкое применение при типовых испытаниях автомобильных и тракторных двигателей для измерения температуры воды в системе охлаждения и масла в картере. Обычно используют паровые термометры с длиной капиллярной трубки $2,5 \div 12 \text{ м}$, защищенной от механических повреждений оплеткой из тонкой медной проволоки. Термометры имеют пределы измерения $0 \div 125^\circ \text{C}$ и шкалу с ценой деления 5°C , но это не затрудняет отсчеты с точностью 2°C , т. е. в пределах возможной точности этих приборов.

Манометрические термометры периодически проверяют путем сравнения их с соответствующими ртутными термометрами. Проверку делают не менее чем по трем точкам, из которых обязательны нижний и верхний пределы шкалы и средняя ее точка.

§ VII.4. Термометры сопротивления

Термометры сопротивления являются самой обширной разновидностью электрических термометров, основанных на том, что некоторые проводники электричества и полупроводниковые материалы изменяют свое сопротивление в зависимости от температуры.

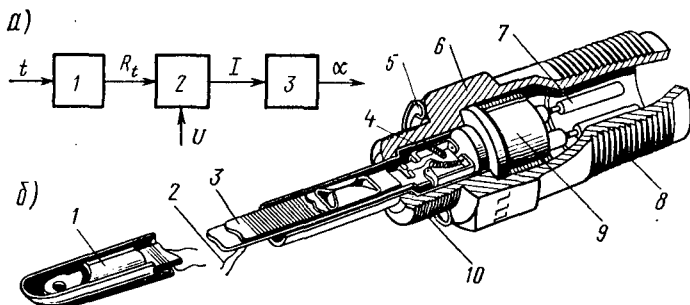


Рис. VII.2. Структурная схема электрического термометра и датчик термометра сопротивления П-1

В общем случае структурную схему электрических термометров считают состоящей из трех звеньев (рис. VII.2, а). В звене 1, представляющем собой обычный или полупроводниковый датчик этого прибора, измеряемая температура t преобразуется в изменение омического сопротивления R_t . В звене 2 измерительной цепи сопротивление R_t вызывает изменение электрического тока I . В звене 3, представляющем собой электроизмерительный прибор (потенциометр, логометр и т. д.), ток I преобразуется в угловое отклонение α стрелки указателя, шкала которого проградуирована в мА или непосредственно в $^{\circ}\text{C}$. Для питания схемы служит посторонний источник с напряжением U .

Если прибор имеет механический преобразователь или передаточно-множительный механизм в измерительной цепи, то термометр называют электромеханическим. Механические звенья снижают точность термометров и делают их более громоздкими, вследствие чего такие приборы находят ограниченное применение.

Электрические термометры сопротивления отличаются высокой чувствительностью и точностью, приемлемой для исследовательских испытаний, и позволяют измерять температуры от -200 до $+1000 \div 1300^{\circ}\text{C}$. Диапазон измерений и другие качества этих термометров определяются свойствами датчика, основного звена прибора, его преобразователя, который в литературе часто отождествляют со всем прибором и называют собственно термометром сопротивления.

Датчики изготовляют из материалов, обладающих возможно высоким и стабильным коэффициентом электрического сопротивления, высоким удельным сопротивлением, химической стойкостью в рабочей среде, жаростойкостью, механической прочностью и воспроизводимостью свойств.

Из проводниковых материалов этим требованиям в большей мере отвечают чистые металлы, такие как платина, никель, медь, железо и др. На практике обычно применяют платиновую, медную и никелевую проволоку диаметром 0,04—0,08 мм. Ее бифилярно, т. е. сложенную вдвое, наматывают на каркас из пластических масс, слюды, кварца, стекла и керамики, обладающих достаточной жароустойчивостью и не оказывающих вредного химического влияния на проволоку намотки.

Каркасы из пластмасс применяют при измерении небольших температур, слюду — для температур, не превышающих $+800^{\circ}\text{C}$, кварц — для высоких. Собранный чувствительный элемент помещают в металлический защитный чехол, предохраняющий его от химического воздействия среды, механических повреждений и действия внешних давлений.

Типичная конструкция современного малогабаритного датчика термометра сопротивления показана на рис. VII,2, б. Его термосопротивление 2 из никелевой проволоки намотано на слюдяной каркас 3, выполненный в виде пластинок. Между подсоединительными штырьками 7, встроенными в изолятор 9, и концами никелевой намотки введено добавочное сопротивление 4. Термосопротивление в сборе с каркасом и изолятором заключено в металлический защитный кожух 1 и вместе с ним закреплено в корпусе 6. Корпус снабжен шестигранником под ключ и двумя нарезками: 10 — для установки на место замера (уплотняется прокладкой 5) и 8 — для накидной гайки крепления наконечника проводов присоединения датчика к измерительной цепи термометра.

Требованиям, предъявляемым к материалам датчиков термометров сопротивления, в известной мере отвечают также объемные полупроводниковые термосопротивления — *термисторы*, представляющие собой смесь из порошкообразных окислов MnO_2 , Cu_2O_3 , Fe_2O_3 , NiO и др., спрессованную и спеченную при высокой температуре. По сравнению с проводниковыми термосопротивлениями, термисторы обладают значительно большим температурным коэффициентом электрического сопротивления. Однако зависимость величины коэффициента от температуры характеризуется резко выраженной нелинейностью и недостаточной стабильностью.

Термисторам придают форму палочек, шариков, шайб или любую другую конфигурацию нужных размеров, начиная от бусинок диаметром менее 0,1 мм. Практика применения термисторов показала, что они пригодны для изготовления термометров с повышенной чувствительностью, позволяющих измерять температуру поверхности тел при весьма малых перепадах.

В технике измерения температур находят также применение полупроводниковые диоды и триоды.

Однако всем указанным выше требованиям полностью не удовлетворяет ни один из названных и вообще известных проводниковых и полупроводниковых материалов, поэтому нужный выбирают соответственно с конкретными условиями измерений и диапазоном изменения температуры.

Платиновые термочувствительные элементы являются лучшими из проволочных датчиков, но вследствие высокой стоимости их применяют обычно в качестве образцовых термометров сопротивления и контрольных для ответственных измерений. Отечественная промышленность выпускает серийно термометры сопротивления с платиновыми датчиками (сокращенно ТСП) для диапазонов измерения — $200 \div 0^\circ\text{C}$; $0 \div +650^\circ\text{C}$ и $0 \div +1300^\circ\text{C}$. Некоторые данные по стандартным ТСП приведены в табл. VII.2 [1]. Для испытания автомобильных и тракторных двигателей изготавливают специальные небольшие датчики или же используют с этой целью малогабаритные датчики авиационного типа (рис. VII.2, б).

Таблица VII.2

Верхний предел измеряемой температуры, $^\circ\text{C}$	Диаметр проволоки, мм	Сопротивление, Ом	Материал каркаса
120	$0,05 \div 0,07$	46; 100	Пластмасса, стекло
650	$0,05 \div 0,07$	46; 100	Стекло, слюда
1300	$0,2 \div 0,5$	0,1; 0,5; 1,0	Плавленный кварц, керамика

Зависимость сопротивления платиновой проволоки от температуры в интервале $0 \div +650^\circ\text{C}$ и более

$$R_t = R_0 (1 + at + bt^2),$$

где R_0 — сопротивление при 0°C ; a и b — постоянные величины; для чистой платины принимают $a = 3,968 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$; $b = -5,847 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-2}$.

Для интервала температур $-200 \div 0^\circ\text{C}$ зависимость сопротивления платины от температуры

$$R_t = R_0 [1 + at + bt^2 + c(t - 100)t^3],$$

где постоянная $c = -4,22 \cdot 10^{-12} \text{ град}^{-4}$.

Чистота платины, употребляемой для изготовления датчиков температуры, должна удовлетворять условию

$$R_{100}/R_0 \geq 1,39,$$

где R_{100} — сопротивление платины при 100°C .

Датчики, рассчитываемые на измерение температур до $+650^\circ\text{C}$, обычно изготавливают из проволоки диаметром $0,05 \div 0,07$ мм; для более высоких температур размер проволоки увеличивают до $0,2 \div 0,5$ мм. Сопротивление таких датчиков составляет от нескольких Ом до 100 Ом. Некоторые данные о длине, весе и сопротивлении платиновой проволоки приведены в табл. VII.3.

В измерительную цепь платиновые датчики выводят путем приваривания к концам намотки проводников диаметром $0,3 \div 1,0$ мм, изготавливаемых из меди при измерении температур до 200°C , из серебра — до 600°C и платины — до 1300°C . Чтобы исключить возможность нагретия чувствительного элемента током, пропускаемым

Диаметр проволоки, мм	Сопротивление 1 м проволоки, Ом	Длина проволоки, имеющей сопротивление 100 Ом, м	Вес 1 м проволоки, гс	Вес проволоки, имеющей сопротивление 100 Ом, гс
0,03	133,0	0,75	0,015	0,011
0,04	75,0	1,33	0,027	0,036
0,05	47,8	2,05	0,042	0,088
0,06	33,2	3,00	0,061	0,184
0,07	24,4	4,10	0,085	0,340
0,08	18,7	5,35	0,108	0,580
0,09	14,8	6,70	0,137	0,930
0,10	11,9	8,80	0,169	1,420
0,15	5,3	19,00	0,380	7,200
0,20	3,0	33,00	0,670	22,400

через измерительную цепь, плотность тока ограничивают (0,5÷0,6) А на 1 мм² сечения проволоки.

Медные термосопротивления, т. е. изготовленные из медной проволоки, используют в термометрах сопротивления при измерении сравнительно низких температурах +150÷180°С в атмосфере, свободной от влажности и корродирующих газов.

Зависимость сопротивления меди от температуры —50÷150°С описывается линейным уравнением

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t),$$

где R_0 — сопротивление при температуре 0°С; α — температурный коэффициент электросопротивления, равный для чистой меди $4,33 \cdot 10^{-3}$ град⁻¹, а для проводниковой — $4,28 \cdot 10^{-3}$ град⁻¹.

Основные преимущества меди, применяемой для изготовления термочувствительных элементов термометров сопротивления, состоят в линейности статической характеристики датчика и стабильности ее свойств, что позволяет изготавливать взаимозаменяемые датчики. Однако интенсивное окисление меди при температуре выше +180°С ограничивает возможности их применения областью измерения температур во впускном тракте двигателя и в системах его охлаждения и смазки.

Стандартные термометры сопротивления с термочувствительными элементами из меди (ТСМ), выпускаемые промышленностью, имеют такие же размеры, как аналогичные термометры ТСП. Датчики термометров ТСМ выполняют с сопротивлением при 0°С, равным 53—100 Ом.

Никелевые термосопротивления применяют для измерения температур —50÷+300°С. Основной недостаток таких сопротивлений состоит в зависимости температурного коэффициента от примесей, содержащихся в никеле. Это не позволяет изготавливать взаимозаменяемые датчики без соответствующих компенсационных устройств.

На практике последовательно сопротивлению R_N в датчик вводят поэтому сопротивление R_M из материала с нулевым или

возможно малым температурным коэффициентом α_m , как сделано, например, в датчике, показанном на рис. VII.2, б (позиция 4). Такие сопротивления изготовляют из марганца или константана. Тогда общее сопротивление датчика

$$R_d = R_{Ni} + R_m,$$

или с учетом начальных величин сопротивлений

$$R_{d0} (1 + \alpha_d \cdot \Delta t) = R_{Ni0} (1 + \alpha_{Ni} \cdot \Delta t) + R_{m0} (1 + \alpha_m \cdot \Delta t),$$

где $\Delta t = t - t_0$ — приращение температуры от начальной t_0 до текущей t , град; α_d , α_{Ni} , α_m — температурные коэффициенты общего сопротивления датчика, никеля и материала дополнительного сопротивления, град⁻¹; R_{d0} , R_{Ni0} , R_{m0} — сопротивления при начальной температуре t_0 .

Если принять температурный коэффициент дополнительного сопротивления $\alpha_m = 0$, то общий температурный коэффициент датчика, состоящего из двух сопротивлений,

$$\alpha_d = R_{Ni0} \alpha_{Ni} / (R_{Ni0} + R_{d0}) = R_{Ni0} \alpha_{Ni} / R_{d0}.$$

Дополнительное сопротивление снижает чувствительность датчика, но позволяет путем подбора коэффициента α_d обеспечивать их взаимозаменяемость. На рис. VII.2, б показан датчик П-1 для измерения температуры масла, воды и воздуха во впускной системе двигателя. Сопротивление R_d этого датчика при температуре 0°С составляет 90,1 Ом и, соответственно, $R_{d100} = 129,8$ Ом.

Полупроводниковые термосопротивления — термисторы — отличаются простотой устройства и исключительно малыми габаритами, большим начальным сопротивлением и повышенной чувствительностью. Однако имеют характеристику с явно выраженной нелинейностью, изменяющейся по закономерности

$$R_t = R_0 e^{\beta (1/T - 1/T_0)} \approx R_0 [1 - (\beta/T_0) t],$$

где R_0 — сопротивление термистора при температуре T_0 ; T — температура тела термистора, К; β — величина, постоянная для данного полупроводникового материала; e — основание натуральных логарифмов.

Наглядной иллюстрацией нелинейности термисторов могут служить графики, показанные на рис. VII.3, которые позволяют сопоставить их с медными термосопротивлениями в относительных величинах для интервала температур $-20 \div +120^\circ\text{C}$.

Промышленность выпускает большое количество обычных и микротермисторов. Наиболее распространены термисторы негерметичные ММТ-1, КМТ-1 и герметичные ММТ-4, КМТ-4 (рис. VII.4, а, б). Оба варианта термосопротивлений выполнены в форме стерженьков 2 диаметром около 1,8 мм, длиной 12 мм, с торцов закрытых металлическими присоединительными колпачками 5. Термосопротивления покрывают эмалевой краской, создающей слой изоляции. При герметичном исполнении собранный термоэлемент помещают в защитный металлический чехол 4, выводы из которого с одной стороны проходят через слой олова 6, а с другой — через

стеклянную пробочку 1. Для улучшения теплопередачи от стенок чехла к термосопротивлению последнее обернуто металлической фольгой 3, покрытой электроизоляционной эмалевой краской. Основные параметры указанных термисторов приведены в табл. VII. 4 [62].

Герметизированные термисторы можно применять в условиях любой влажности и агрессивности среды, допустимой для оболочки 4. Негерметизированные термисторы применяют только в сухих поме-

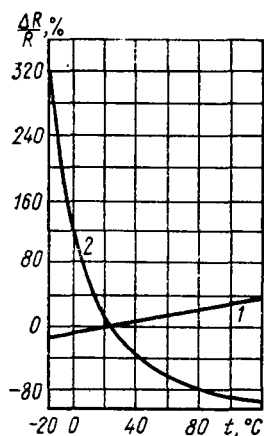


Рис. VII.3. Зависимости сопротивления медного (кривая 1) и полупроводникового (кривая 2) термосопротивлений от температуры

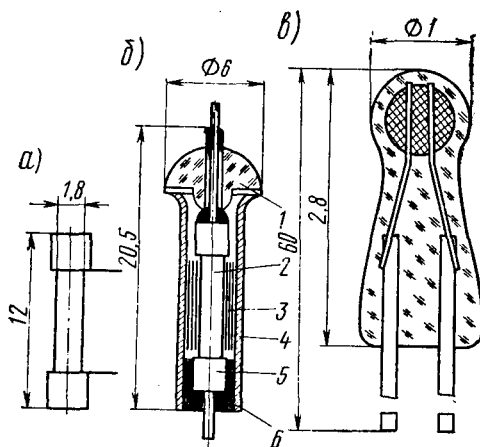


Рис. VII.4. Термосопротивления.
а — ММТ-1 и КМТ-1; б — ММТ-4 и КМТ-4;
в — МКМТ-16

щениях. Термисторы указанных типов выпускают с номинальными значениями сопротивлений $1000 \div 200\,000$ Ом (при температуре $+20^\circ\text{C}$) для измерения температур $-100 \div 120^\circ\text{C}$. Однако с точки зрения тепловой инерционности эти термосопротивления обладают относительно большой массой термочувствительного элемента. Их постоянная времени в воздухе составляет $85 \div 115$ с. Такой недостаток отсутствует у полупроводниковых микротермосопротивлений.

Микротермисторный датчик температуры бусинкового типа МКМТ-16 со стеклянным корпусом показан на рис. VII.4, в. Объемное сопротивление его выполнено в виде шарика диаметром около 0,8 мм с выводами из платиновой проволоки диаметром 0,05 мм, к концам которых приварены проводники из нихромовой проволоки диаметром 0,1 мм. Датчики МКМТ-16 имеют постоянную $\beta = 3400$ К и номинальные значения сопротивлений 2700 и 5100 Ом при 20°C . Они предназначены для измерения температур $-60 \div +120^\circ\text{C}$ и могут работать в среде с давлениями, изменяющимися от 1 мм рт. ст. до 100 кгс/см^2 ($\approx 10 \text{ МН/м}^2$), в условиях вибрации

Таблица VII.4

Параметры	Типы термосопротивлений	
	ММТ-1, ММТ-4	КМТ-1, КМТ-4
Диапазон номинальных сопротивлений, кОм	1—200	20—1000
Допустимое отклонение от номинальных значений, %	20	20
Температурный коэффициент сопротивления при 20° С, град ⁻¹	—0,024÷—0,034	—0,045÷—0,06
Разброс по величине температурного коэффициента, % на 1° С	0,2	0,2
Постоянная β, К	2060—2920	3880—5150
Максимально допустимая мощность, Вт	0,4	0,8—0,9
Максимальная рабочая температура, К	393	453; 393
Мощность рассеивания, практически не вызывающая разогрева термосопротивления, Вт	0,002—0,005	0,002—0,005
Постоянная времени в воздухе, с	85; 115	85; 115

с ускорениями до 15 g и ударной тряски при ускорениях до 12 g. Тепловая инерция датчика порядка нескольких секунд.

Еще меньшей постоянной времени обладают микротермисторы КМТ-14, термочувствительная бусинка которых имеет диаметр порядка 0,1 мм. Бусинка помещена на конце тонкой стеклянной трубочки, герметизирована в стекле и снабжена манганиновыми выводами. Манганин сравнительно плохой проводник тепла, благодаря чему уменьшаются погрешности вследствие теплообмена бусинки с присоединительными проводами. Постоянная времени такого микротермистора в воздухе не превышает 1 с.

Кроме нелинейности характеристики термисторам свойственна повышенная нестабильность. Отклонения от образца к образцу составляют $\pm 20 \div \pm 30\%$. Это полностью исключает возможность изготовления взаимозаменяемых датчиков без индивидуальных подстроек и усложнения измерительной схемы, что сдерживает широкое применение термисторов в стандартных термометрах сопротивления. Но в условиях измерения температуры при повышенной вибрации объекта и в исследовательских целях, когда прибегают к индивидуальной градуировке прибора, применение термисторов вполне оправдано и целесообразно.

Полупроводниковые диоды и триоды (транзисторы) с успехом применяют как датчики температуры, используя зависимость сопротивления их переходов от температуры.

Так как вольт-амперная характеристика диодов, т. е. изменение силы тока по напряжению, нелинейна, то для измерения температуры используют характеристику изменения напряжения на диоде в зависимости от его температуры при постоянном значении тока, протекающего в прямом направлении через переход. Последнее достигают путем последовательного включения диода и большого активного сопротивления в цепь с источником постоянного напряже-

ния. Чтобы исключить погрешности измерений вследствие внутреннего разогрева диода, протекающий через него ток устанавливают порядка 1—2 мА. Термометрические характеристики диодов, изготовленных из одного материала, отклоняются на величину до 3%, хотя сами характеристики обладают приемлемой линейностью.

В транзисторах действие температуры на переход эмиттер-база такое же, как у диода. Но транзисторы, как датчики температуры, отличаются тем, что они одновременно действуют и как термометры, и как усилители собственного сигнала до сравнительно высокого

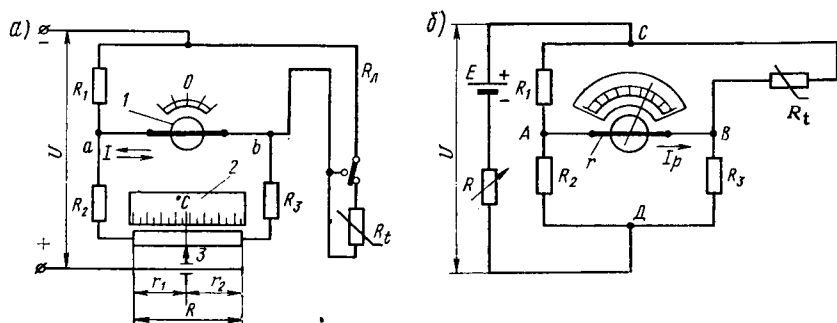


Рис. VII.5. Мостовые измерительные схемы термометров сопротивления

уровня. Термометрические характеристики транзисторов в первом приближении можно считать линейными.

Постоянные времени в воздухе составляют величину порядка 30 с у диодов и около 60 с у транзисторов, т. е. меньше, чем у обычных термисторов типа ММТ и КМТ.

Измерительная схема электрических термометров с проводниковыми и полупроводниковыми термосопротивлениями представляет собой мостовую схему с включенными в нее датчиком температуры и регистрирующим прибором — указателем. Для этой цели чаще всего применяют самые простые равновесные и неравновесные мостовые схемы постоянного тока, в которые, кроме транзисторов, могут быть включены любые из описанных выше термосопротивлений. Однако общая методика измерений всегда предопределяется выбранной мостовой схемой. Так, в термометрах сопротивления с равновесным мостом измерения можно проводить по наиболее точному нулевому методу, а с мостом неравновесным — только по дифференциальному методу, фиксируя при этом непосредственно отклонения стрелки прибора вследствие разбаланса моста [68].

Термометр сопротивления с равновесной мостовой схемой, управляемой вручную с помощью потенциометра R , регулируемые участки сопротивлений которого r_1 и r_2 включены в два смежных ее плеча, показан на рис. VII.5, а. При неизменных величинах сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 , R_t равновесие приведенной схемы нарушается из-за изменения сопротивления R_t датчика вследствие повышения или понижения температуры объекта. Равно-

весие системы восстанавливают путем перемещения движка 3 потенциометра, изменяя сопротивления участков r_1 и r_2 так, чтобы в диагонали ab отсутствовал ток I и стрелка нуль-индикатора I устанавливалась на нулевую отметку.

Так как в равновесном состоянии мостовой схемы при $I=0$ произведения сопротивлений противоположных ее плеч равны друг другу

$$R_1 (R_3 + r_2) = (R_2 + r_1) (R_4 + R_5),$$

то каждому значению сопротивления датчика R_t соответствует вполне определенное положение движка 3. Однозначность положения движка 3, а следовательно, и стрелки указателя от сопротивления R_t позволяет градуировать шкалу 2 термометра непосредственно в $^{\circ}\text{C}$.

При градуировке шкалы термометра длину проводов, соединяющих датчик с измерительной цепью, следует принимать большую из возможных, чтобы в случае увеличения расстояния до места установки датчика не прибегать к удлинению присоединительной линии и сохранить величину сопротивления R_d . С целью свести также к минимуму дополнительные температурные погрешности из-за изменения сопротивления самих плеч моста, вследствие возможного нагрева в процессе измерения сопротивления плеч, изготовляют из материала с малым температурным коэффициентом.

Применение равновесных мостовых схем для термометров сопротивления заметно повышает точность их показаний, поскольку на работу равновесных мостов не оказывает влияния изменение напряжения U источника питания. Но известные неудобства вызывает при этом необходимость установки прибора на нуль перед каждым отсчетом. Это осложняет работу испытателей и увеличивает продолжительность испытаний. Поэтому рациональнее применять серийные автоматические уравнивающие мосты типа ЭМ-120 с электронным усилителем сигнала разбаланса.

Электрическая схема ЭМ-120 аналогична рассмотренной, но снабжена подгоночным и эталонным сопротивлениями и питается переменным током, а сигнал разбаланса моста после усиления подается на управляющую обмотку асинхронного электродвигателя привода регулировочного устройства потенциометра.

Автоматические мосты выпускают со шкалами всех стандартных градуировок термометров сопротивления и могут быть использованы при испытании двигателей. Основная погрешность их не превышает $\pm 0,5\%$.

Термометры сопротивления с неравновесным мостом (рис. VII.5, б) позволяют определять температуру непосредственно по величине тока I_p разбаланса, протекающего по диагонали AB , в которую с этой целью включен микроамперметр со шкалой, проградуированной в $^{\circ}\text{C}$. Сила тока в диагонали моста

$$I_p = U (R_1 R_3 - R_2 R_4) / K,$$

где U — напряжение, приложенное к измерительному мосту; R_t — сопротивление датчика температуры; R_1 , R_2 и R_3 — сопротивления плеч моста;

$$K = R_b r (R_1 + R_2 + R_3 + R_t) + R_3 (R_1 + R_2) (R_3 + R_t) + r (R_1 + R_t) (R_2 + R_3) + \\ + R_1 R_2 R_t + R_2 R_3 R_t + R_3 R_t R_1 + R_3 R_1 R_2,$$

здесь R_b — внутреннее сопротивление источника тока; r — сопротивление гальванометра.

Таким образом, показания термометров сопротивления с неравновесным мостом зависят от величины напряжения U источника питания. Следовательно, напряжение U должно строго контролироваться в процессе измерений. Для этой цели в измерительной схеме предусмотрен реостат R , введенный в цепь источника тока. Контроль осуществляют с помощью гальванометра в диагонали моста и эталонного сопротивления R_s , которое включают вместо датчика. Если стрелка прибора не устанавливается при этом на контрольной отметке шкалы, то величину напряжения на зажимах питающей диагонали CD доводят до нормы реостатом R .

Достоинства неравновесной схемы состоят в относительной простоте устройства и возможности непосредственного отсчета измеряемой температуры по шкале указателя тока без корректировки величин сопротивления его плеч.

К недостаткам таких схем относятся необходимость частого контроля величины напряжения тока питания, что порождает методические погрешности измерений, и возникновение дополнительной инструментальной погрешности при нагреве катушки гальванометра вследствие изменения величины r ее сопротивления. Чтобы исключить основной из этих недостатков и обеспечить точность измерения, не зависящую от колебаний напряжения источника питания схемы, в качестве регистрирующего прибора применяют магнитоэлектрический двухрамочный указатель отношения токов — логометр.

Следует также отметить, что неравновесные мостовые схемы с одноили двухрамочными логометрами в диагонали чаще всего применяют при измерении температур с помощью термисторов [62].

Электрические термометры с диодами и транзисторами в качестве датчиков имеют схемы, показанные на рис. VII.6.

В приборах с диодами вследствие нелинейности вольт-амперной характеристики последних поддерживают постоянную величину силы тока, протекающего в прямом направлении. Достигается это путем последовательного включения диода D и сопротивления R в цепь источника тока с напряжением 1,5 В, причем силу тока, проходящего

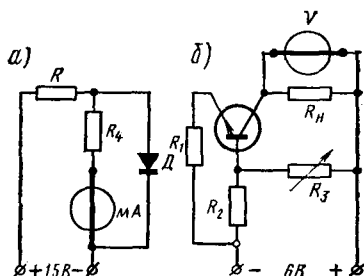


Рис. VII.6. Принципиальные схемы термометров с диодом (а) и транзистором (б) в качестве датчиков

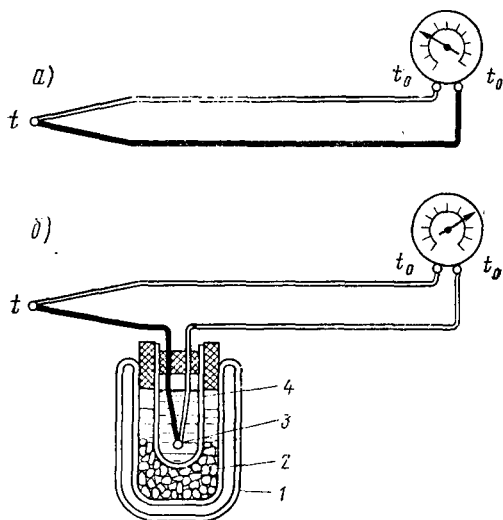
через диод, ограничивают 2 мА, иначе неизбежен внутренний его разогрев и возникновение температурных ошибок.

Применение германиевого диода в сочетании с сопротивлениями $R=6,8$ кОм и $R_4=18$ кОм позволяет измерять температуру $-40 \div +90^\circ \text{C}$. При использовании кремниевых диодов верхний предел измерения повышается. Указателем термометра служит микроамперметр на 500 мкА с внутренним сопротивлением 2 кОм.

В приборах с транзисторными датчиками выходное напряжение изменяется от 0 до 3 В, поэтому они работают с менее чувствительным указателем, чем приборы с диодами. Прибор, схема которого показана на рис. VII.6, б, собран на германиевом транзисторе типа П-8. Режим работы транзистора регламентируется тремя постоянными сопротивлениями R_1 , R_2 , R_n и одним переменным сопротивлением R_3 . Питание осуществляется от источника тока напряжением 6 В. Прибор позволяет измерять температуры в диапазоне $-20 \div +60^\circ \text{C}$. Шкала его близка к равномерной.

§ VII.5. Термоэлектрические термометры (пирометры)

Электрические термометры этого типа, называемые также *пирометрами*, основаны на использовании термоэлектрического эффекта,



возникающего при нагреве места спая двух проводников из неоднородных металлов или сплавов. Если два других конца этих проводников замкнуть, то под действием термоэлектродвижущей силы (термо-э.д.с.) нагреваемого спая в образовавшейся цепи возникнет электрический ток, силу которого можно измерить чувствительным прибором. Спаянную (сваренную) таким образом пару разнородных проводников или иначе термоэлементов называют *термопарой*.

Рис. VII.7. Схемы термпары (а) и термоэлектрической измерительной цепи (б)

Принципиальная схема термпары с подключенным к ней регистрирующим

прибором показана на рис. VII.7, а. Нагреваемый спай термпары, находящийся при температуре t измеряемой среды, именуют горячим, или рабочим; второй — холодным, или свободным, имеющим температуру t_0 . Предпочтительнее термины *горячий* и *холодный*, поскольку они точнее выражают сущность процесса.

Термо-э. д. с. термопары при одном и том же перепаде температур $t - t_0$ между спаями может принимать различные значения вследствие того, что уровень ее определяется не только перепадом температур, но и абсолютными величинами температур горячего и холодного концов. Следовательно, результирующая термо-э. д. с. термопары в общем случае будет равна разности термо-э. д. с. обеих ее спаев, находящихся при температуре t и t_0 :

$$E = f(t) - f(t_0).$$

Чтобы получить нужную однозначность зависимости термо-э. д. с. от температуры горячего спая, температуру холодного конца термопары необходимо поддерживать постоянной. Для выполнения этого непрерывного условия холодный спай термопары целесообразнее всего погружать в среду с температурой тающего льда. В практике холодный спай 3 помещают в сосуд 1 с двойными стенками, наполненный тающим льдом 2; причем спай, погружаемый в воду, может быть заключен в тонкую стеклянную пробирку 4 (рис. VII.7, б). Применяют и другие способы термостатирования холодного спая, если описанный осуществить нельзя.

Тарировку термопар проводят при постоянной температуре $t_0 = 0^\circ \text{C}$ холодного спая, а горячему спаю последовательно задают определенную температуру и фиксируют развиваемую термопарой термо-э. д. с. По данным опыта строят тарировочный график зависимости термо-э. д. с. от температуры (рис. VII.8).

Приведенный на рисунке тарировочный график платино-платинородиевой термопары, полученный при температуре холодного спая $t_0 = 0^\circ \text{C}$, наглядно иллюстрирует явную нелинейность термо-э. д. с. этой стандартной термопары в диапазоне $0 \div +600^\circ \text{C}$. При дальнейшем увеличении температуры нагрева горячего спая термо-э. д. с. ее изменяется по закономерности, близкой к прямолинейной.

Металлы для термоэлектродов термопар должны отвечать следующим требованиям: 1) обеспечивать возможно большую величину термо-э. д. с. при данном перепаде температур; 2) иметь высокую стойкость в рабочей среде; 3) обеспечивать постоянное приращение

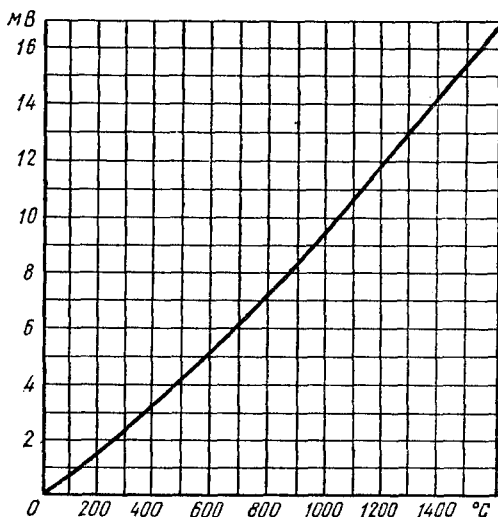


Рис. VII.8. Тарировочный график термопары платинородиевой — платина при температуре холодного спая $t = 0^\circ \text{C}$

термо-э. д. с. при нагреве, включая продолжительный нагрев;
4) иметь сравнительно небольшую стоимость.

По особенностям материалов, применяемых в термопарах, последние можно разделить на три группы: термопары из благородных металлов, из обычных металлов и из металлических проводников, спаянных с неметаллическими. Основные материалы электродов приведены в табл. VII.5.

Таблица VII.5

Металл или сплав	Химический состав, %	Термо-э. д. с., мВ *
Хромель	89Ni; 9,8Cr; 1Fe; 0,2Mn	+2,9
Железо	Fe	+1,8
Медь	Cu	+0,76
Платинородий	90Pt; 10Rn	+0,64
Платина	Pt	+0,00
Алюмель	94Ni; 2Al; 2,5Mn; 1Si; 0,5Fe	-1,2
Константан	60Cu; 40Ni	-3,5
Копель	56Cu; 44Ni	-3,9

* Термо-э. д. с. металлов и сплавов в паре с платиной при температурах спаев $t=100$ и $t_0=0^\circ\text{C}$.

К первой группе относят платинородий-платиновые и платино-иридий-платиновые термопары. Благодаря стойкости электродов этих термопар в условиях высоких температур и в окислительной среде показания их весьма стабильны. Однако развиваемые ими термо-э. д. с. невелики, а стоимость материала электродов высокая.

Платино-платиноиридиевые термопары употребляют редко из-за сравнительно низкой термо-э. д. с., а также быстрого распыления иридия при температуре выше 1000°C и сплавления его с платиновым термоэлектродом, что еще больше понижает термо-э. д. с.

Платино-платинородиевые термопары (ПП) (ПП — стандартное обозначение платино-платинородиевых термопар) применяют для измерения температуры $0\div 1600^\circ\text{C}$. Для диапазона температур $630\div 1063^\circ\text{C}$ их применяют в качестве образцовых, эталонных (см. тарифный график на рис. VII.8). Платиновые стандартные термопары изготовляют из проволоки диаметром 0,5 мм. Более тонкие провода недостаточно прочны и резко увеличивают сопротивление цепи, а толстые электроды дорogi.

ПП термопары устойчивы против окисления, но чувствительны к восстанавливающим газам (водороду, окиси углерода) и к парам металлов и кремнезема. Соприкосновение ПП термопары с названными газами и парами при высоких температурах изменяет ее термоэлектрические свойства. К тому же при температуре около 1200°C платиновые чувствительные элементы становятся хрупкими и механически непрочными. Поэтому в указанных случаях термопару следует заключать в предохранительный чехол.

Платиновые термоэлектроды можно применять также в паре со многими другими материалами. Термо-э. д. с., развиваемые платиновыми термопарами, приведены в табл. VII.5.

Термопары второй группы отличаются малой стоимостью и доступностью материала. Вследствие этого сечение электродов ограничивается их инерционностью, что позволяет увеличивать механическую прочность и снижать электросопротивление термопары. Наиболее распространены из этой группы термопары, рассматриваемые далее.

Хромель-алюмелевые термопары (ХА) имеют практически линейную характеристику и обладают хорошей стойкостью в окислительной среде. При температуре 1000°C они развивают термо-э. д. с., равную 41 мВ, весьма надежны в работе, поэтому их широко применяют для измерения температуры отработавших газов двигателей. Чтобы уменьшить инерционность, термоэлектроды ХА термопар изготовляют диаметром не более 0,5 мм. Недостатки — повышенная хрупкость при температуре свыше 1000°C и возможное изменение характеристики при длительной работе в окислительной среде.

Хромель-копелевые термопары (ХК) обладают характеристикой, близкой к линейной, и самой высокой термо-э. д. с., достигающей 50 мВ при 600°C . Но жаростойкость их невелика. При температуре 800°C ХК термопары могут работать лишь кратковременно из-за недостаточной жаростойкости копея.

Медь-копелевые термопары (МК) применяют для измерения температур не выше $400 \div 600^{\circ}\text{C}$, так как медь сильно окисляется и при температуре 600°C может работать только кратковременно. Медь-копелевые так же, как и железо-копелевые термопары, не обладают какими-либо существенными преимуществами по сравнению с хромель-копелевыми.

Медьконстантановые термопары применяют для диапазона температур $-100 \div +300^{\circ}\text{C}$. В диапазоне температур $0 \div +100^{\circ}\text{C}$ они служат образцовыми термопарами и используются при тарировке других приборов. В интервале температур до $+100^{\circ}\text{C}$ погрешности их не превышают $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, а термо-э. д. с. составляет около 4 мВ. Термопары, выполненные в виде медной трубки с вмонтированной внутрь ее константановой проволокой диаметром около 0,7 мм, пригодны для измерения температур до $+500^{\circ}\text{C}$.

Нихром-константановые термопары обладают высокой термо-э. д. с., равной 5,6 мВ на 100° , и могут работать при нагреве до 900°C .

Термопары из никель-кобальтового сплава и специального алюминия (НК — СА) по жаростойкости не уступают хромель-алюмелевым и развивают термо-э. д. с., лишь начиная от температуры нагрева примерно $+300^{\circ}\text{C}$. Благодаря этому холодный спай НК — СА термопар можно не погружать в лед, что облегчает организацию измерения температуры. Но термопары НК — СА имеют сравнительно небольшую термо-э. д. с., составляющую менее 10 мВ при нагреве до $+800^{\circ}\text{C}$.

Термопары из железоникелевого сплава (НЖ 11) и разновидности сплава копея (СК) обладают значительно большей термо-э. д. с., чем термопары НК — СК. Термо-э. д. с. их при температуре 800°C достигает 30 мВ. Начинают действовать они примерно со 100°C и

могут поэтому работать без специальных устройств для термостатизации холодного спая.

К третьей группе относятся термопары с электродами из молибдена, тантала, вольфрама и других тугоплавких металлов, а также из неметаллических соединений — графита, карбидов, боридов и т. д. Термопарами этой группы измеряют температуры до 2000°C и более высокие. Для измерения высоких температур в агрессивных средах применяют термопары с электродами из твердых тугоплавких соединений циркония — борида ZrB_2 и карбида ZrC . Эти соединения циркония относительно прочны, обладают низким электрическим сопротивлением и устойчивы против действия водорода, окиси углерода, расплавленных цветных и черных металлов, некоторых солей и шлаков. Боридо-карбидные циркониевые термопары имеют практически линейную термоэлектрическую характеристику и развивают термо-э. д. с., равную примерно 16 мВ при температуре 1800°C .

Изготовление термопар облегчается тем, что способ соединения термоэлектродов в термоэлектрические пары не оказывает влияния на величину термо-э. д. с., если весь спай имеет одинаковую температуру нагрева. Это позволяет выбирать наиболее технологичный вариант соединения проводников, учитывая назначение термопары. Так, термопары с медным электродом спаивают серебром или припоем; электроды из других благородных металлов сваривают в пламени ацетиленовой горелки или с помощью электрической дуги. Термоэлектроды из платины и ее сплавов сваривают в электрической дуге, образованной между тонким, остро заточенным графитовым электродом и обоими термоэлектродными термопарами. После сварки спай доводят до диаметра термоэлектродов и, если возможно, придают ему П-образную форму, что благоприятно сказывается на точности измерений.

Термоэлектроды обязательно изолируют друг от друга, а изоляцию заключают в металлический чехол, защищающий ее от механических повреждений. Если горячий спай не обладает нужной механической прочностью или становится хрупким при нагреве, то его тоже помещают в металлическую трубку, которую одновременно можно использовать для защиты термоэлектродов от воздействия обслежуемой среды. В последнем случае для уменьшения инерционности термопары ее термоэлектроды рекомендуется вваривать в доннышко защитного чехла, а сам чехол делать возможно меньшего диаметра.

Для изоляции термоэлектродов применяют теплостойкую резину, если термопара рассчитана на измерение температуры, не превышающей 150°C ; шелк — до $100\div 120^{\circ}\text{C}$; эмаль — до $150\div 200^{\circ}\text{C}$; асбест — до 700°C ; кварцевые трубки и бусы — до 1100°C ; фарфоровые трубки, керамику и бусы — до 1500°C . Термоэлектроды из благородных металлов изолируют кварцевыми и фарфоровыми трубками, хотя последним присуща низкая механическая прочность. При выборе изоляции учитывают, что асбест гигроскопичен и не пригоден для влажных сред; кварц теряет прочность при нагреве свыше 1100°C и быстро разрушается под действием щелочи, солей щелоч-

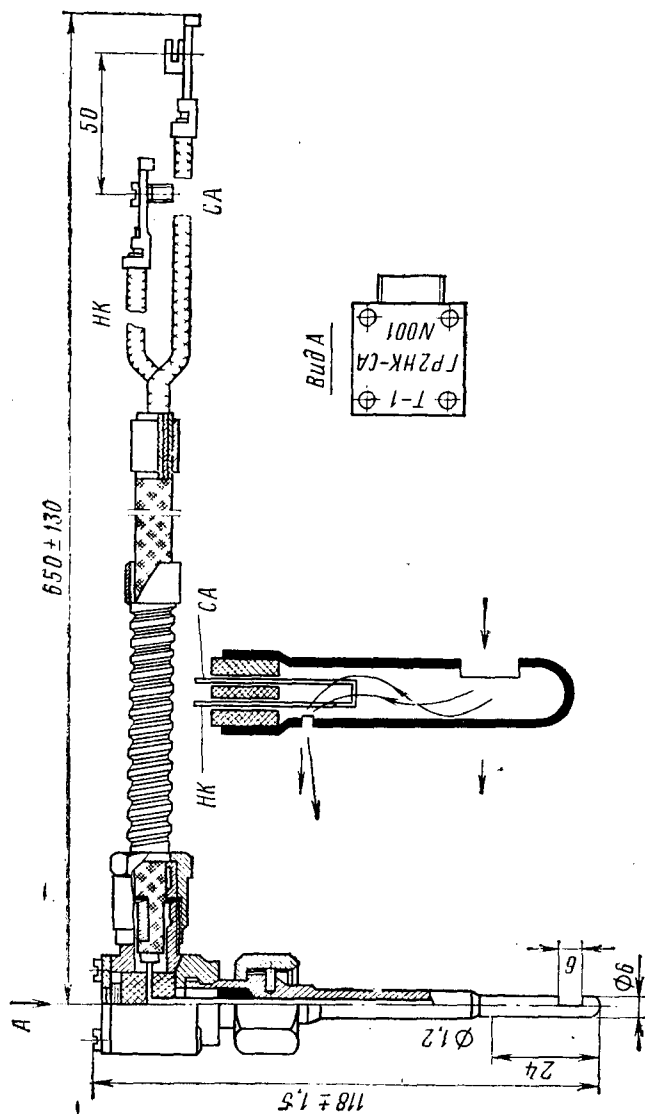


Рис. VII. 9. Термопара НК—СА в сборе с чехлом и присоединительными проводами

ных металлов и ржавчины, но хорошо выдерживает резкие изменения температуры в обследуемой среде.

Типичная термопара НК — СА, пригодная для измерений в автомобильных и тракторных двигателях, в сборе с корпусом и присоединительными проводами показана на рис. VII.9. Термоэлектроды ее изготовлены из проводников диаметром 1,2 мм, которые в зоне горячего спая изогнуты под прямым углом и сварены встык. Для надежности изоляции термоэлектроды встроены в двухканальную керамическую трубку. В головке, навинченной на верхнюю часть защитного чехла, термоэлектроды согнуты под углом и введены внутрь гибкого шланга. Термопарой НК — СА измеряют температуру отработавших газов двигателей. Путь газов, омывающих горячий спай, показан на рисунке стрелками; холодный спай термопары не термостатируют, поскольку действовать она начинает при температуре около 300°C , что значительно превышает рабочую температуру холодного спая.

Термоэлектрические цепи, как известно, допускают включение между концами термоэлектродов или в разрыв одного из них третьего или одновременно нескольких проводников, и это не оказывает влияния на величину термо-э. д. с. термопары, если концы вновь присоединяемых проводников находятся при одинаковой температуре. Благодаря такому свойству показания регистрирующего прибора, вынесенного за пределы термопары (см. рис. VII.7), определяются температурами t и t_0 тех же спаев термопары, что позволяет вести дистанционные измерения теплового состояния среды в зоне размещения ее горячего спая. Однако нарушение теплового состояния спаев присоединительных проводов порождает токи в цепи, искажающие результаты измерений. Чтобы исключить это, присоединительные провода, условно называемые также *компенсационными* (в действительности они ничего не компенсируют), выбирают с учетом свойств материалов, из которых изготовлены термоэлектроды термопары.

Так, например, для термопар НК — СА применяют медные присоединительные проводники, которые в паре с термоэлектродами НК и СА развивают пренебрежительно малые термо-э. д. с. даже в случае значительных изменений температуры окружающей среды. Но это является исключением. Обычно в целях борьбы с паразитными токами на участках от термопары до регистрирующего прибора применяют провода из тех же материалов, из которых изготовлены термоэлектроды данной термопары или же из материалов с аналогичными термоэлектрическими свойствами.

Для платиновых, положим, термопар соединительные провода из-за большой стоимости платины и ее сплавов с родием или иридием изготовляют из меди и сплава, содержащего 99,4 меди и 0,6% никеля.

Для хромель-алюмелевых термопар используют медные и константановые присоединительные провода, которым соответственно придают красную и коричневую окраски. Такие провода выпускают с сечением 1,0; 1,5 и $2,5\text{ мм}^2$.

Достоверность показаний термоэлектрических термометров во многом зависит от температурного состояния холодного спая. Если

холодный спай нельзя термостатировать путем погружения его в среду таящего льда, как при тарировке термопары, то прибегают к методам компенсации температуры этого спаия или же вводят поправку на показания прибора с учетом фактической температуры холодного спаия.

Из простейших эффективных способов стабилизации температуры холодного спаия можно рекомендовать способ автоматического термостатирования с помощью электрического подогрева.

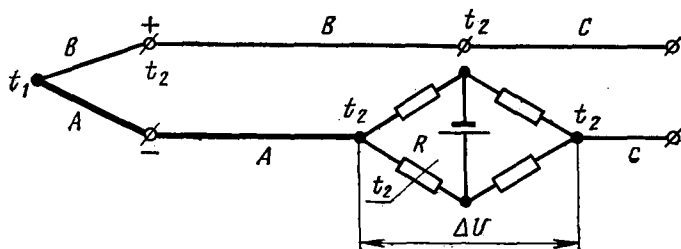


Рис. VII.10. Схема компенсации дополнительной погрешности термопары при изменении температуры окружающей среды

При известной, отличной от 0°C , температуре холодного спаия поправку к показаниям термоэлектрического термометра вводят следующим образом. Положим, что температура холодного спаия равна t_1 , а температуру горячего спаия обозначим через t . Тогда для определения температуры t , прибавив к показанной гальванометром термо-э. д. с. термопары E_{t-t_0} величину термо-э. д. с. E_{t_1} , соответствующую температуре ее холодного спаия, получим $E_t = E_{t-t_1} + E_{t_1}$. Пользуясь далее тарировочным графиком данной термопары, находим температуру t горячего спаия, т. е. температуру среды, в которую погружена термопара. Суммирование при этом температуры, показанной гальванометром с температурой холодного спаия, приводит, однако, к увеличению методической температурной погрешности, особенно в случае явно выраженной нелинейности характеристики термопары. Поэтому введение поправки на температуру холодного спаия термопары делают путем непосредственной перестановки стрелки гальванометра, проградуированного в градусах, в нулевое положение, соответственно с фактической температурой холодного спаия. Такой способ приемлем при любой характеристике термопары.

В практике испытаний автомобильных и тракторных двигателей наиболее распространен метод автоматического введения поправки на температуру холодного спаия с помощью компенсирующего устройства типа КТ-54 или КТ-08 [68].

Последнее представляет собой неравновесную мостовую схему, составленную из трех постоянных манганиновых сопротивлений и одного медного или никелевого переменного сопротивления R , величина которого пропорциональна температуре холодного спаия термопары. Мост включают в измерительную цепь термопары (рис. VII.10)

и питают от аккумуляторной или сухой батареи или же от выпрямителя типа НСП-2.

При температуре градуировки мост находится в равновесии, поэтому напряжение на его выходной диагонали равно нулю. С повышением температуры холодного спая величина R увеличивается, поскольку переменное сопротивление изготовлено из материала с положительным температурным коэффициентом. Вследствие этого мост выходит из равновесия, а возникающее напряжение на выходной диагонали его автоматически компенсирует уменьшение термо-э. д. с., развиваемую термопарой.

В случаях нелинейности характеристики термопары использование такой мостовой схемы не обеспечивает полной коррекции температурной погрешности, но остаточная величина ее не превышает 0,04 мВ на 10°.

Известны и более точные способы автоматической компенсации температуры холодного спая термопары, но они значительно сложнее описанного [62].

Измерение термо-э. д. с., развиваемой термопарами, проводят с помощью милливольтметров и потенциометров.

Милливольтметры позволяют прямыми измерениями оценивать непосредственно величины термо-э. д. с., возникающие в цепи, состоящей из термопары, соединительных проводов и самого милливольтметра (гальванометра). Под действием термо-э. д. с. E_T термопары в цепи перечисленных элементов устанавливается ток

$$I = E_T / (R_T + R_{пр} + R_m),$$

где R_T — сопротивление термоэлектродов; $R_{пр}$ — сопротивление соединительных проводов; R_m — сопротивление милливольтметра, называемого внутренним сопротивлением измерительной цепи.

При этом вследствие потерь в соединительных проводах и термоэлектродов, составляющих внешнее сопротивление цепи, напряжение на клеммах регистрирующего прибора — гальванометра — всегда бывает меньше развиваемого термопарой, а именно:

$$U_m = E_T R_m / (R_T + R_{пр} + R_m),$$

следовательно,

$$E_T = U_m [1 + (R_{пр} + R_T) / R_m],$$

или

$$E_T = U_m + \Delta U,$$

где $\Delta U = U_m (R_T + R_{пр}) / R_m$ — поправка, учитывающая потери напряжения в термопаре и в соединительных проводах.

Поэтому для повышения точности определения термо-э. д. с. с помощью милливольтметра необходимо знать сопротивление цепи и, используя приведенную зависимость, вносить поправки в его показания. Вполне очевидно, величина поправки уменьшается с увеличением внутреннего сопротивления R_m . Вследствие этого сопротивление милливольтметра, т. е. внутреннее сопротивление цепи, делают достаточно большим по сравнению с внешним ее сопротивлением.

Однако следует иметь в виду, что когда комплекс термоэлектрического термометра, состоящий из термопары, соединительных проводов и милливольтметра, предварительно подвергают тарировке (а в практике лабораторий двигателей это всегда делают), то поправку на потери во внешней цепи термометра не вносят.

Определение термо-э. д. с. предпочтительнее делать потенциометрами. Эти приборы основаны на наиболее точном нулевом методе измерения и практически допускают любое сопротивление цепи в пределах до 100 Ом.

На рис. VII.11 показана принципиальная схема потенциометра, состоящая из трех сопротивлений R_1 , R_2 и R_3 , миллиамперметра mA с нулевой отметкой в средней части отсчетной шкалы, переключателя Π и трех источников э. д. с.; E — сухого элемента, E_T — термопары и E_N — нормального элемента.

Измеряемая величина термо-э. д. с. E_T термопары в описанной схеме уравнивается падением напряжения U_{ab} на участке ab переменного сопротивления R_2 . Так как

$$U_{ab} = IR_{ab} = E_T,$$

то величина тока I_1 должна оставаться неизменной. Для настройки прибора величину I_1 устанавливают с помощью нормального элемента, подключение которого вместо термопары дает постоянное напряжение, равное 1,0183 В при 20° С. При нормальной силе тока I_1 падение напряжения на сопротивлении R_1 равно 1,0183 В и ток, протекающий через нуль-прибор, равен нулю. В случае отклонения величины тока I_1 от нормального значения прибор настраивают с помощью реостата R_1 , добиваясь нулевого показания нуль-прибора (миллиамперметра).

По окончании настройки, состоящей в установлении необходимой величины силы тока I_1 , прибор переключают с нормального элемента на термопару и определяют ее термо-э. д. с. С этой целью скользящий контакт движка b перемещают по обмотке R_2 реохорда до получения равенства $I_1 R_{ab} = I_2 R_T = E_T$. Об этом судят по нулевому показанию миллиамперметра mA , а результаты измерения отсчитывают по шкале, расположенной вдоль обмотки реохорда R_2 .

Поскольку изменение температуры t горячего спая вызывает соответствующее изменение термо-э. д. с. E_T термопары, то в процессе измерений наблюдатель должен сообразно с силой тока I_2 перемещать движок в положение, при котором устанавливается нулевое показание миллиамперметра. Чтобы уменьшить трудоемкость изме-

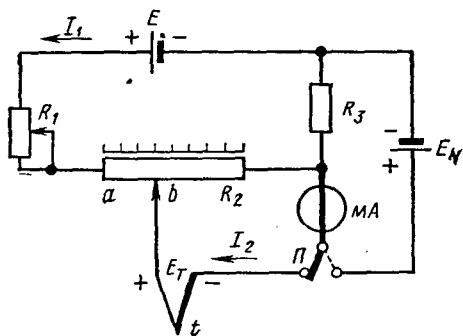


Рис. VII.11. Принципиальная схема измерительной цепи для компенсационного измерения термо-э. д. с.

рения температуры методом компенсации, на практике применяют потенциометры с электромеханической или электронной следящей системой, которая автоматически устанавливает скользящий контакт движка b в положение, соответствующее нулевому положению стрелки миллиамперметра.

Автоматический самопишущий потенциометр типа СП-1 с электромагнитной следящей системой снабжен реохордом R_2 , выполненным из манганиновой проволоки длиной 1 м. Реохорд заключен в стеклянный сосуд, заполненный маслом, что повышает несколько стабильность показаний прибора. Потенциометр обеспечивает измерения с точностью $\pm 0,5\%$ при вариации показаний $\pm 0,4\%$, не зависящих от параметров проводов, соединяющих его с термопарой, обладает мощным приводом самопишущего пера и может быть использован в устройствах автоматического регулирования и сигнализации. Недостатки таких потенциометров заключаются в малой виброустойчивости нуля прибора, сравнительно малом быстродействии и сложности следящего механизма системы компенсации.

Электронные показывающие и самопишущие автоматические потенциометры не имеют недостатков, присущих потенциометрам типа СП-1. Так, в электронном потенциометре ЭП-120 стрелка указателя от нулевой до максимальной отметки перемещается за 20 с; в его схему введена специальная малоинерционная термопара, позволяющая значительно снижать влияние колебаний температуры холодного спая на точность показаний. Промышленность выпускает также быстродействующие электронные автоматические потенциометры АП-140, стрелка указателя которых весь диапазон от начальной до конечной отметок шкалы проходит за 8 с, а основная погрешность не превышает $\pm 1\%$.

Следует отметить, что точность измерений термо-э. д. с. термопар потенциометрами всегда бывает выше, чем милливольтметрами, поскольку при прочих равных условиях показания потенциометров свободны от ошибок, связанных с влиянием электросопротивления соединительных проводов и термоэлектродов. В момент снятия показаний в измерительной цепи прибора, оснащенного потенциометром, ток отсутствует, следовательно, не может быть и падения напряжения в ее элементах.

§ VII.6. Измерение температуры в емкостях и потоках

В реальных условиях измерения температур всегда возможно некоторое расхождение между температурой измеряемой среды и температурой погружаемого в нее датчика прибора. Поэтому результаты измерений предопределяются не только свойствами регистрирующего прибора, но и тем, насколько удастся приблизить температуру датчика к действительной температуре измеряемой среды в емкостях и потоках. Возможная разность и составляет при этом ошибку измерений. Величина ее зависит от: способа размещения датчика в измеряемой среде, теплопроводности материала, излучения

тепла поверхностью датчика и его тепловой инерции, а также от скорости и характера движения потока.

Погрешности измерения, связанные с теплопроводностью материала датчика и способом установки его в потоке, имеющем одинаковую температуру во всех точках, но отличающуюся от температуры места заделки датчика, определяют на основании уравнений теплопроводности

$$\Delta t = t_d - t = (t_o - t) / \operatorname{ch} [l \sqrt{\alpha_t \Pi / (\lambda f)}],$$

где t_d , t и t_o — соответственно температура конца датчика, среды, в которую он погружен, и места заделки (основания) датчика; l — длина погруженной части датчика; Π и f — периметр и площадь поперечного сечения соответственно; λ — коэффициент теплопроводности материала датчика; α_t — коэффициент теплопередачи от среды к датчику; ch — гиперболический косинус.

Для наиболее типичного случая, когда чувствительный элемент термометра заключен в предохранительный чехол, представляющий собой трубку диаметром d с толщиной стенок δ , имеем

$$\Pi = \pi d, \quad f = \pi (d - \delta) \delta \approx \pi d \delta.$$

Тогда

$$\Delta t = t_d - t = (t_o - t) / \operatorname{ch} [l \sqrt{\alpha_t / (\lambda \delta)}].$$

В приведенных формулах теплопроводности величину

$$\operatorname{ch} (l \sqrt{\alpha_t / (\lambda \delta)}) = \operatorname{ch} x = (e^{+x} + e^{-x}) / 2$$

находят по справочным таблицам. Анализ этих формул позволяет заключить, что потери вследствие теплопроводности можно уменьшить путем: изготовления защитного чехла для преобразователя из материала с малым значением λ ; увеличения глубины l погружения датчика и повышения значения коэффициента α_t ; уменьшения площади f сечения защитного чехла до размеров, ограничиваемых механической прочностью трубки и применения тепловой изоляции места заделки датчика с целью повышения температуры t_o у его основания.

На практике предусматривают поэтому возможно глубокое погружение датчика в измеряемую среду и устанавливают его против направления движения среды, а трубопровод в зоне размещения датчика покрывают теплоизолирующим материалом, как показано на рис. VII.12. Из способов размещения датчиков в трубопроводе, показанных на рисунке, предпочтительны варианты *a* на прямолинейном участке трубопровода и *б*, если последний имеет колено. Способ *в* менее эффективен, но прост по исполнению и применяют его широко. Совсем не рекомендуется размещать датчик по потоку, поскольку в этом случае газ или жидкость омывают вначале защитный чехол в месте заделки датчика и потом уже более холодными подходят к зоне чувствительного элемента термометра. Вследствие этого термометр фиксирует несколько меньшую температуру, чем имеет обследуемая среда.

Как отмечалось, погрешности измерения температуры уменьшаются также с увеличением интенсивности теплопередачи от измеряемой среды к датчику. В общем случае, когда неодинаковость температуры среды незначительна и физические параметры ее можно считать неизменяющимися, коэффициент теплопередачи α_t определяют из соотношения, существующего между критериями теплового подобия Нуссельта (Nu), Рейнольдса (Re) и Прандтля (Pr) по следующей, хорошо известной эмпирической формуле:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4},$$

если при этом $Re > 5 \cdot 10^3$ и $0,6 < Pr < 100$.

Так как

$$Nu = \alpha_t d / \lambda; \quad Re = \rho w \alpha_t / \mu \quad \text{и} \quad Pr = c_p \mu / \lambda,$$

то, решая приведенную зависимость относительно коэффициента α_t теплопередачи или теплоотдачи, найдем

$$\alpha_t = 0,023 [(\rho w)^{0,8} / d^{0,2}] \times \\ \times (\lambda^{0,6} \cdot c_p^{0,6} / \mu^{0,4}),$$

где ρ — плотность среды; w — скорость потока; d — диаметр датчика; μ — динамический коэффициент вязкости; c_p — теплоемкость среды при постоянном давлении; λ — коэффициент теплопроводности среды.

Из полученного выражения видно, какие именно факторы и в какой степени оказывают влияние на коэффициент теплопередачи. Величина его изменяется, как мы видим, почти пропорционально скорости и плотности потока, или так называемой массовой скорости ρw в степени 0,8, и обратно пропорционально диаметру датчика в степени 0,2. Воздействуя на эти факторы, можно, следовательно, увеличить значение α_t и, соответственно, уменьшить погрешности измерения.

Критерий Прандтля для воздуха, как известно, мало зависит от температуры. Практически $Pr = 0,71$, тогда справедливо соотношение

$$Nu = a Re^m,$$

откуда следует, что

$$\alpha_t = a (\rho w / \mu)^m (\lambda / d^{1-m}).$$

В расчетах принимают

$$a = 0,52; \quad m = 0,47 \quad \text{при} \quad Re = 1 \cdot 10^4 \div 1 \cdot 10^5; \\ a = 0,18; \quad m = 0,62 \quad \text{при} \quad Re = 1 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^5.$$

Чтобы увеличить коэффициент α_t , на практике измерения температуры стремятся уменьшить размеры датчика и, если возможно, прибегают к обдуву его чувствительного элемента, как показано, например, на рис. VII.9, или же отсасывают с этой целью неболь-

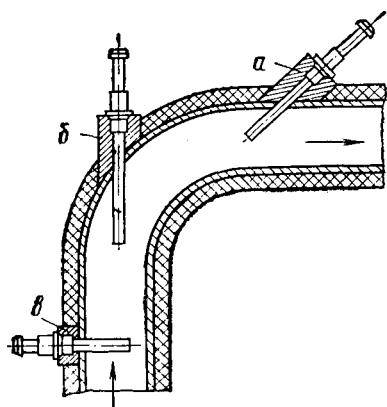


Рис. VII.12. Установка датчика температуры в трубопроводах

шое количество газа из зоны установки датчика, интенсифицируя обдув последнего.

Погрешности измерения из-за лучистого теплообмена между датчиком и стенками трубопровода возникают вследствие разности температуры нагрева стенок и температуры протекающего потока. При наличии теплопередачи путем излучения тепла поверхностью датчика поправка

$$\Delta t = (c/\alpha_r) [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4],$$

где T_1, T_2 — абсолютные температуры датчика и стенок трубы; α_r — коэффициент теплопередачи от среды к датчику; c — приведенный коэффициент лучеиспускания:

$$c = \frac{1}{1/c_1 + (F_1/F_2)(1/c_2 - 1/c_0)},$$

здесь c_1, c_2 — коэффициенты лучеиспускания поверхностей датчика и стенок трубопровода; c_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела; F_1 — поверхность датчика; F_2 — поверхность трубопровода, участвующая в лучистом теплообмене с поверхностью датчика.

Таким образом, величина данной погрешности обратно пропорциональна коэффициенту теплопередачи от среды к датчику и пропорциональна разности четвертых степеней абсолютных температур датчика и стенок трубы, а также приведенному коэффициенту лучеиспускания этих поверхностей. Но, поскольку $F_2 \gg F_1$, то практически отношение $F_1/F_2 \approx 0$ и приведенный коэффициент c можно считать равным коэффициенту c_1 лучеиспускания поверхности датчика, т. е. $c = c_1$.

Для уменьшения погрешностей, связанных с лучистым теплообменом, трубопровод утепляют наложением на его стенки слоя тепловой изоляции или вводом экрана между датчиком и стенками трубопровода, который препятствует непосредственному лучистому теплообмену датчика со стенками. При возможности подогревают стенки трубопровода в зоне размещения датчика до температуры потока, что позволяет устранять рассматриваемые погрешности. Однако осуществление перечисленных мероприятий связано с определенными трудностями. Поэтому на практике стремятся также уменьшить влияние коэффициентов c_1 и α_r . Величина c_1 зависит, как известно, от материала датчика и качества обработки его поверхности. Поскольку коэффициент лучеиспускания шероховатых поверхностей вдвое больше гладких, то поверхность датчиков рекомендуется полировать и содержать в чистоте. Коэффициент теплопередачи α_r повышают описанными ранее способами.

Погрешности измерения температуры в связи с тепловой инерцией термометров возникают при работе на переменных режимах или перемещении датчика в среду с другой температурой, так как на выравнивание температуры датчика и среды затрачивается определенное время. Время, через которое ошибка измерения становится равной или меньше допустимой, называют *временем установления (постоянной времени)*.

Текущее значение температуры $t_{ч.э}$ чувствительного элемента отстает от температуры $t_{ср}$ среды на величину динамической погрешности

$$\Delta t = t_{ч.э} - t_{ср},$$

причем величина последней предопределяется постоянной времени данного термочувствительного элемента. При выборе термометров предпочтение отдают прибору, обладающему меньшей постоянной времени.

Погрешности измерения температуры в потоках, имеющих сравнительно большую скорость движения, возникают из-за неизбежного частичного торможения потока в области расположения термоприемника, вызывающего дополнительный его нагрев [69].

Поток газа, имеющий некоторую скорость ω движения и температуру t , обладает, как известно, определенной кинетической энергией, которая при торможении потока уменьшается и переходит в тепловую. Вследствие этого энтальпия газа изменяется, и его температура возрастает.

Очевидно, повышение температуры газа в случае полного адиабатного торможения в условиях, когда выделяющаяся теплота не успевает рассеиваться, может быть найдено на основе закона сохранения энергии:

$$A[\omega^2/(2g)] = c_p(t_s - t),$$

где A — термический эквивалент работы; c_p — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении.

В отличие от термодинамической, или статической, температуры t , которая была бы измерена прибором, неподвижным относительно потока, т. е. движущимся вместе с ним, температуру заторможенного газа t_s при его полном торможении называют *температурой торможения*

$$t_s = t + A[\omega^2/(2gc_p)].$$

Для скоростей течения, равных 50, 100 и 200 м/с, величина $(t_s - t)$ соответственно равна 1,2; 5 и 20 град.

Практически термоприемник, установленный в потоке газа, всегда показывает температуру t'_s , отличную от t_s и t , так как обтекающий его газ затормаживается только частично. Следовательно,

$$t'_s = t + r[A\omega^2/(2gc_p)],$$

где r — коэффициент восстановления, который имеет величину < 1 и не всегда стабилен, особенно для поперечно обтекаемых термопар (термоприемников). Установлено, что наибольшие по величине и стабильности значения r достигаются при использовании датчика температуры, показанного на рис. VII.9, обеспечивающего измерение температуры, близкой к температуре заторможенного газа. Располагая величинами t'_s и ω , нетрудно ввести поправку в показания измерителя температуры.

Измерение температуры отработавших газов затруднено еще и тем, что поток их имеет пульсирующий (неустановившийся)

характер движения при сравнительно больших колебаниях скорости движения и температурного состояния. Газы, покидающие цилиндр двигателя в течение первой относительно короткой фазы выпуска, имеют, как известно, более высокую температуру, чем газы, выталкиваемые поршнем при ходе выпуска. Поэтому в зависимости от целей исследования часто определяют не только среднюю температуру отработавших газов по изложенной выше методике, но фиксируют и мгновенные ее значения.

В литературе [43, 58, 69] рассмотрены различные экспериментальные методы определения температуры газа в пульсирующих потоках как косвенным, так и непосредственно контактным измерением ее значений.

Косвенные способы определения мгновенных значений температуры основаны на использовании или скорости распространения звука в излучаемой среде, или скорости распространения в трубопроводе волны конечной амплитуды.

Первый из них состоит в применении звукового генератора и приемника звука, которые размещают на некотором расстоянии друг от друга. Измеряя время, за которое звук проходит это расстояние, определяют его скорость и, следовательно, температуру среды по известным соотношениям. Данный способ позволяет определять среднюю в объеме мгновенную температуру, а так как термометрическим веществом служит сам газ, то на результаты измерения температуры не оказывают влияния тепловая инерция приемника и действие излучения, которое возможно в случаях введения в поток каких-либо датчиков [43].

При определении температуры по способу распространения волны конечной амплитуды снимают диаграммы изменений статических и полных давлений в двух сечениях потока, расположенных в трубопроводе на принятом расстоянии друг от друга. В работе [43] подробно рассмотрены методы получения и обработки результатов измерений, позволяющие определять и скорость газа, и среднюю его температуру в объеме между принятыми сечениями трубопровода за рассматриваемый промежуток времени Δt .

Измерение мгновенных значений температуры способом непосредственного контакта газов с чувствительным элементом термопар и термометров сопротивления широко используют при экспериментальном обследовании нестационарных потоков. Для уменьшения тепловой инерции их изготавливают из проволоки диаметром 5–30 мкм и более, если это необходимо по условиям механической прочности с учетом возможного нагрева. Применяют платино-платинородиевые и хромель-алюмелевые термопары или термометры сопротивления, изготавливаемые из вольфрамовой проволоки, имеющей почти линейную температурную характеристику.

Поскольку в местах спая (сварки) термопар возникает утолщение, то они более инерционны, чем термометры сопротивления из проволоки того же сечения. Наличие спая снижает еще и механическую прочность чувствительного элемента. Поэтому на практике

чаще всего пользуются термометрами сопротивления, которые, кроме всего, позволяют осреднять температуру по сечению потока и удобнее термопар с точки зрения последующего усиления и формирования сигнала датчика в измерительной цепи.

На практике применяют двух- и трехпроводочные термометры сопротивления; предпочтительнее с трехпроводочным датчиком [43],

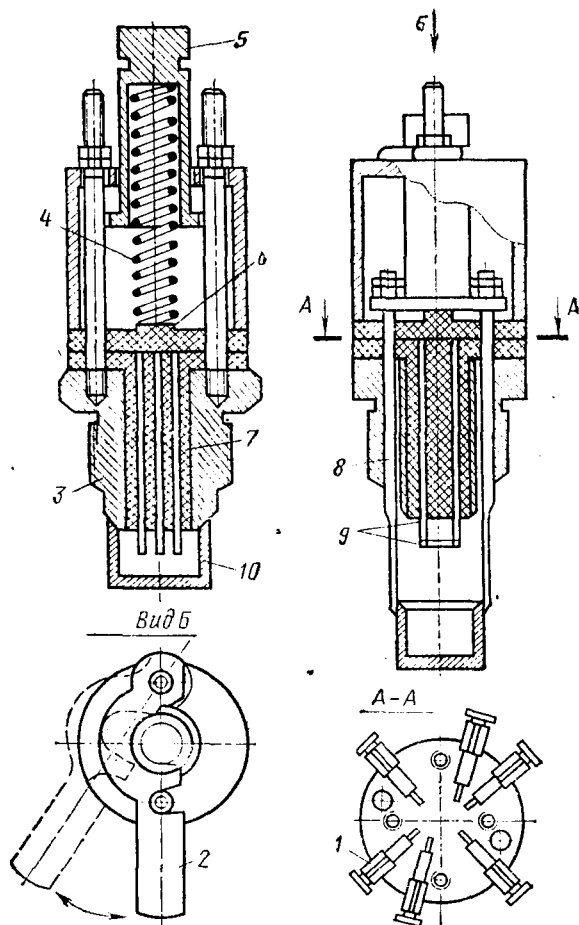


Рис. VII.13. Датчик с тремя проволоками для измерения мгновенных значений температуры

устройство которого показано на рис. VII.13. В корпусе 3 закрепляют фторопластовый изолятор 7 с шестью державками 9, выполненными из миллиметровой хромелевой проволоки. Выходные концы державок с помощью двух шпилек и кожуха зажаты в радиальных канавках торцовых поверхностей изоляторов 6 и 7, что фиксирует их от проворачивания, и через клеммы 1 к ним подсоединяют про-

вода измерительной схемы. К каждой паре державок приварены вольфрамовые проволоочки диаметром 10, 20 и 30 мкм с измерительной базой, равной 6 мм. В промежутках между замерами проволоочки защищают колпачком 10, который плотно прижимается к корпусу пружиной 4, действующей на него через головку 5 и шпильки 8. При измерении нажатием на головку 5 колпачок 10 опускают вниз и в этом положении фиксируют его стопором 2.

Температура T_s заторможенного потока и температура T_1 проволоочки связаны между собой соотношением [43]:

$$T_1 = T_s + r [Aw^2 / (2gc_p)] - Bd_{\text{пр}}^{2-m} (dT_1 / d\tau),$$

в котором вследствие малости соответствующих величин и с целью упрощения не учтено влияние теплового излучения на коэффициент восстановления r . Для каждого данного момента времени и всех трех проволоочек в этом соотношении величины

$$T_s = \text{const}; \quad r [Aw^2 / (2gc_p)] = \text{const}$$

и

$$B - [c\rho / (4K\lambda)] (v/w)^m = \text{const},$$

где $d_{\text{пр}}$, ρ и c — соответственно, диаметр, плотность материала и удельная теплоемкость проволоочки; v — кинематическая вязкость газа. Для значений $Re = 10 \div 1000$ экспериментальный коэффициент $K = 0,52$ и показатель степени $m = 0,47$.

Таким образом, переменной величиной в рассматриваемом соотношении является произведение $d_{\text{пр}}^{2-m} (dT_1 / d\tau)$ и зависимость между величинами T_1 и T_s описывается поэтому прямой линией в координатах T_1 и $d_{\text{пр}}^{2-m} (dT_1 / d\tau)$ с ординатой пересечения ее с осью T_1 , равной $y = T_s + r [Aw^2 / (2gc_p)]$. Следовательно, значение мгновенной температуры торможения газа определяется разностью

$$T_s = y - r [Aw^2 / (2gc_p)].$$

Применение трехпроволочных датчиков по изложенной методике позволяет определять температуру газа не только в точке перегиба кривой изменения температуры той или иной проволоочки по времени, а в любой момент времени.

Измерение температуры в потоке горючей смеси осложнено тем, что поток имеет неоднородную структуру, состоящую из паровоздушной основы и взвешенных в ней капелек распыленного топлива. Наличие капелек жидкого топлива в таком двухфазном потоке создает условия, при которых показания термометра зависят как от температурного состояния паровоздушной части потока, так и от температуры капелек жидкости. Когда на чувствительный элемент термометра попадают капельки жидкости, он охлаждается и показания его снижаются; в сухом состоянии чувствительный элемент фиксирует температуру паровоздушной фазы потока.

Иллюстрацией этому может служить, например, диаграмма, представленная на рис. VII.14, которая получена путем осциллографирования показаний малоинерционного термометра сопротивления.

Нить его, имевшая диаметр 9 мкм и постоянную времени менее 0,6 мс, омывалась потоком горючей смеси [56]. При соответствующей частоте попадания капелек на нить, когда последняя успевает высыхать, способ позволяет фиксировать и температуру T_n паровоздушной фазы потока, и температуру T_k капле топлива, как показано на диаграмме. В иных случаях этим способом не удастся четко фиксировать температурное состояние отдельных фаз потока.

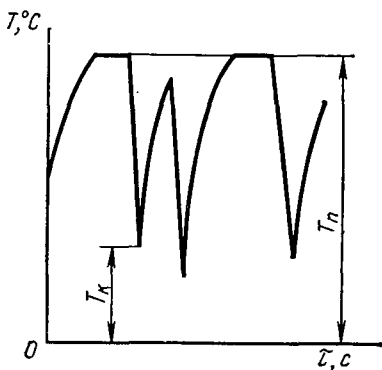


Рис. VII.14. Осциллограмма температуры в потоке горючей смеси

На практике измерения температуры в потоках двухфазных сред обычно применяют экранирование термометров со стороны набегающего потока. Однако в применении, например, к поршневым карбюраторным двигателям оно не совсем эффективно, поскольку для последних характерен так называемый обратный выброс, от которого термометр с односторонним экраном оказывается незащищенным.

В литературе приведены методы защиты термодатчиков (например, термоанемометров) в многофазных потоках, или в общем случае дисперсных потоках, путем применения электростатических и других средств [38].

§ VII.7. Измерение температуры деталей двигателей

При доводке новых и совершенствовании существующих автомобильных и тракторных двигателей большое внимание уделяют исследованию теплового состояния основных деталей их механизмов и систем. Особенно тщательно обследуют детали кривошипно-шатунного и клапанного механизмов, тепловая напряженность которых, как правило, лимитирует возможность дальнейшего форсирования двигателей с целью улучшения их показателей.

Измерение температуры деталей, включая подвижные, проводят с помощью различных термопар и термометров сопротивления, которые устанавливают на поверхности деталей или встраивают непосредственно в их тело. В отдельных случаях применяют нанесение на поверхность детали термочувствительных красок, установку специальных штифтов, плавких вставок («свидетелей»), заделываемых в тело деталей, и другие способы.

Термопары и термометры сопротивления позволяют с достаточной точностью фиксировать местную температуру деталей при условии обеспечения надежного контакта их термочувствительного элемента с обследуемой деталью и удовлетворительной организацией

токосяема, особенно в случаях измерения температуры подвижных деталей в быстроходных двигателях внутреннего сгорания.

Чтобы уменьшить погрешности измерения, некоторую часть термопары, примыкающую к горячему спая, стараются уложить на изме-

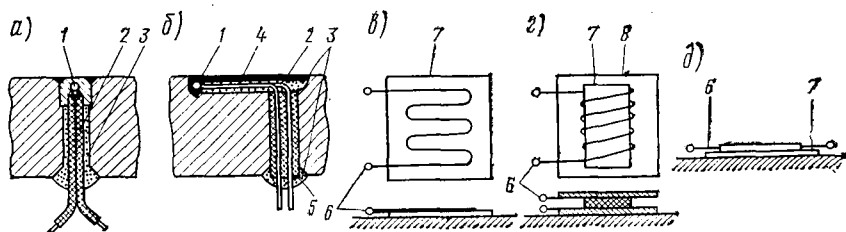


Рис. VII.15. Способы установки датчиков для измерения температуры деталей двигателя:

а — с помощью капсуля; б — заделка термопары с наплавкой металла по пазу; в — проволоочный термометр сопротивления, наклеиваемый на подложку; г — то же, с намоткой на пластину; д — пленочный датчик, напыленный на подложку; 1 — горячий спай термопары; 2 — термоэлектродные провода; 3 — жаростойкий цемент; 4 — наплавка; 5 — фарфоровая трубочка; 6 — чувствительный элемент; 7 — подложка или основа; 8 — защитные пластины или пленки

ряемую (изотермическую) поверхность [58, 69] и добиваются хорошего контакта головки спая с последней путем тщательной заделки (рис. VII.15 и VII.16).

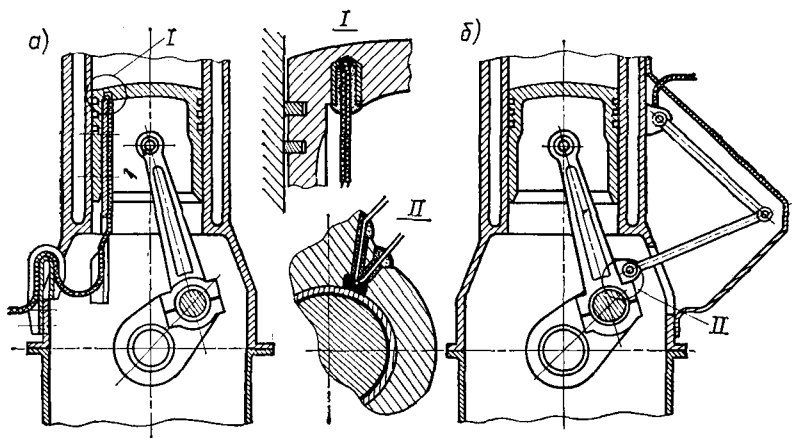


Рис. VII.16. Способы токосяема при термометрировании подвижных деталей двигателя:

а — с помощью гибкого тросика-проводника; б — с применением рычажной системы

Чаще всего горячий спай термопары заделывают в специальный капсоль, который запрессовывают затем в подготовленное в обследуемой детали гнездо. Материал капсюля по физическим свойствам

(коэффициент температурного расширения и др.) должен быть сходен с материалом этой детали. При установке в сквозное отверстие капсуля выполняется глухим, и для улучшения контакта с деталью его можно дополнительно зачеканить или приварить (рис. VII.15, а). Место заделки необходимо зашлифовать заподлицо с поверхностью детали. При заделке капсуля в глухое отверстие (рис. VII.16, а) горячий спай термопары выводится через сверление в дне капсуля и припаивается к последнему серебряным припоем. Надежный контакт спая с материалом детали обеспечивают запрессовкой капсуля в подогретую до $80\text{--}90^\circ\text{C}$ деталь с предварительным вводом в гнездо легкоплавкого сплава.

В случаях обследования, например, теплового состояния подшипниковых вкладышей горячий спай термопары заделывают иногда непосредственно в гнездо (рис. VII.16, б), применяя для этого сварку или пайку, а изолированные концы термопары предварительно выводят через два наклонных сверления (см. позицию II). Для такой заделки можно применять также зачеканку горячего спая в отверстии с последующей зашлифовкой этого места заподлицо с поверхностью детали.

При измерении температуры поверхности деталей применяют также заделку термопар по схеме, показанной на рис. VII.15, б, добиваясь при этом полного закрытия горячего спая путем пайки или заварки. В последнее время для этой цели широко применяют и термометры сопротивления, устанавливая их на поверхность по схемам, изображенным на рис. VII.15, в и г. В первом случае проволоочный чувствительный элемент наклеивают на электроизолятор-подложку, во втором наматывают на пластинку и закрывают с двух сторон. По схеме, изображенной на рис. VII.15, д, датчик полупроводникового термометра сопротивления получают путем напыления на подложку или непосредственно на обследуемое тело и получают так называемый пленочный датчик, с помощью которого удается записывать и быстроизменяющуюся температуру.

Термометрирование подвижных деталей двигателя во многом предопределяется организацией токосъема, который выполняют с непрерывным или периодическим контактированием датчика термометра с его измерительной цепью. Предпочтительнее непрерывный токосъем, как показано, например, на рис. VII.16, а. Датчик соединен здесь с измерительной цепью гибким тросиком-проводником, который перемещается при работе двигателя в специальных направляющих. Данный способ применим только для двигателей тракторов со скоростью вращения вала до 1500 об/мин. По схеме, изображенной на рис. VII.16, б, токоотбор идет по проводам, смонтированным в рычажную систему. В этом случае система работает удовлетворительно при скоростных режимах до 3500 об/мин, поэтому ее можно применять для двигателей грузовых автомобилей.

Для более быстроходных двигателей и в случаях длительных испытаний применяют токосъемники, обеспечивающие периодическое подключение датчика температуры к измерительной цепи устройства. Общая схема такого устройства для термометрирования клапанов

показана на рис. VII.17. Указатель ее — осциллограф — можно поочередно подключать к нескольким датчикам.

В отдельных случаях для обследования тепловой напряженности деталей применяют простейшие способы, не требующие сложных устройств. Обычно используют термочувствительные краски и плавкие вставки.

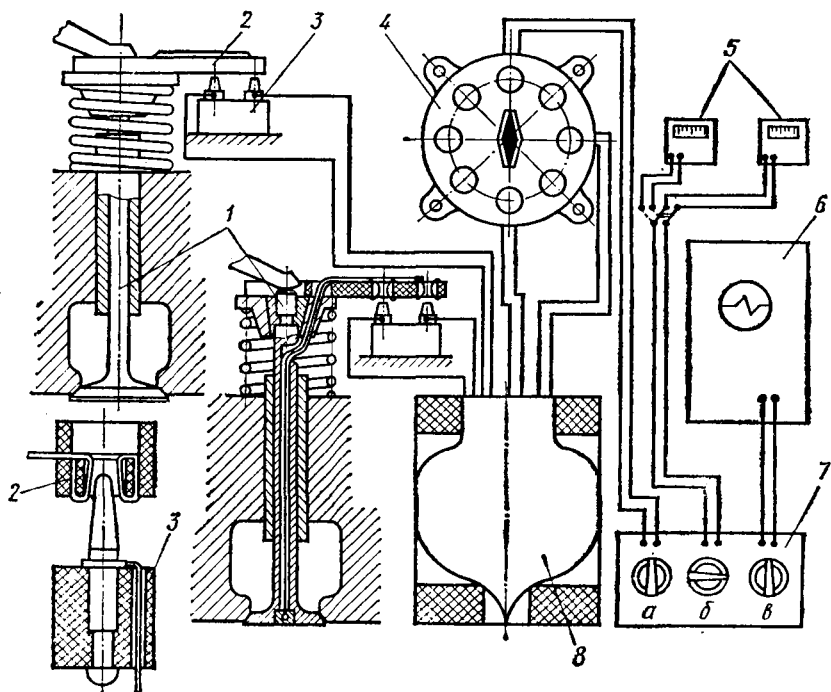


Рис. VII.17. Схема измерений термо-э. д. с. при периодическом токо-съеме:

1 — клапаны двигателя; 2 и 3 — элементы токосъемного устройства; 4 — переключатель; 5 — милливольтметры; 6 — осциллограф; 7 — компенсационный прибор (с ручками: а — грубой регулировки; б — переключателя; в — тонкой регулировки); 8 — сосуд Дюара

Способ измерения температуры поверхностей деталей с помощью термочувствительных красок основан на изменении их цвета при нагреве. Полезен он тем, что нанесение термочувствительного слоя на обследуемую деталь не связано с разрушением ее поверхности и позволяет выявлять распределение температур на больших полях при нагреве $50 \div 1500^\circ\text{C}$. Промышленность выпускает наборы термокрасок и специальных карандашей, обеспечивающих возможность определения температуры поверхностей с точностью порядка 10%, если краски тщательно подобраны, а образцы их протарированы.

На практике применяют иногда и плавкие вставки, например, при обследовании теплового состояния поршней в двигателях. Способом вставок можно измерять температуры до 800°C через сравнительно малые интервалы. Так, сплав, содержащий 28% золота и 72% теллура, плавится при 120°C , а сплав из 58% висмута и 42% свинца — при 125°C и т. д.

Сплав-свидетель помещают в тонкостенный капсюль диаметром 2—3 мм, изготавливаемый из металла, близкого по составу к материалу обследуемой детали, и запрессовывают в подготовленное для этого гнездо в детали. Температуру плавления металла вставок подбирают так, чтобы из двух соседних капсюлей вставка плавилась в одном. Иначе нельзя четко фиксировать местный нагрев детали.

Способ вставок-свидетелей трудоемок, требует частой разборки механизмов и не обеспечивает должной точности измерений, поэтому он находит весьма ограниченное применение.

ГЛАВА VIII

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДОВ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

§ VIII.1. Общие сведения

Потоки газов и жидкостей, возникающие при работе поршневых двигателей, в большинстве своем имеют пульсирующий, прерывистый или так называемый нестационарный характер движения. Нестационарность потоков, с которыми приходится иметь дело при испытании поршневых двигателей, свойственна им не только на неустановившихся, но и на установившихся режимах работы*.

Известно, что нестационарность потоков сглаживается при увеличении числа оборотов вала двигателя и с переходом на большее число цилиндров, но в принципе всегда имеет место независимо от количества цилиндров и скоростного режима работы. Это обстоятельство, а также то, что скорость отдельных струек в потоке неодинакова по его поперечному сечению, значительно осложняют определение истинных параметров потока и служат источником основных погрешностей при измерении расхода. Чтобы упростить задачу и одновременно обеспечить требуемую точность измерений, в практике испытаний автомобильных и тракторных двигателей применяют ряд мер и прибегают к допущениям, не вносящим заметных искажений в результаты измерений.

Во-первых, стремятся выравнять по времени движение потока через мерное устройство; во-вторых, расходуемые жидкости или газ отмеривают с помощью мерных сосудов (емкостей) или взвешиванием; в-третьих, определяют не истинные, а средние величины давлений и скорости по времени и поперечному сечению потока, при которых обеспечивается расход, равный расходу при их действительных значениях в данном сечении потока; в-четвертых, все расчеты ведут в предположении неразрывности потока и отсутствия теплообмена его с внешней средой; в-пятых, измерительные устройства тщательно тарируют и по мере необходимости корректируют их показания.

Расходы жидкостей и газов измеряют в объемных, массовых или весовых единицах за определенный промежуток времени и в данный

* Согласно ГОСТ 14846—69 к установившимся относят режимы с устойчивыми (стабилизировавшимися) значениями крутящего момента, числа оборотов вала, температур охлаждающей воды или воздуха, отработавших газов, нагрева масла и нагрева головок (при воздушном охлаждении), величины которых без каких-либо значительных изменений наблюдаются не менее 1 мин.

момент времени. В первом случае применяют счетчики количества протекающей жидкости или газа и получают суммарное значение расхода. Эту же цель достигают с помощью заранее оттарированных мерных объемов, взвешивания или измерением параметров движения потока электрическими и газодинамическими средствами с последующим пересчетом по известным формулам. Во втором — мгновенное значение расхода, используя для этого различные расходомеры-ротаметры, флуометры (дословно, потокоизмерители) или электрические и иные способы измерений.

§ VIII.2. Измерение расхода воздуха

Расход воздуха определяют непосредственным измерением его объема, протекающего через мерное устройство, или косвенным путем — измерением определенных параметров потока, характеризующих среднюю или мгновенную скорость его движения. Для прямых измерений широко используют различные счетчики газа, а в отдельных случаях — газгольдеры *. При косвенном определении расхода: прибегают к дросселированию мерного трубопровода с целью получения некоторого перепада давлений в потоке, измеряют динамический напор потока, выявляют изменение его теплового состояния при прохождении участка трубопровода между двумя последовательно расположенными сечениями и теплообмен между чувствительным элементом прибора и потоком, фиксируют скорость распространения ультразвуковых колебаний по движению и против движения потока, используют ионизацию газа и перенос с потоком радиоактивных веществ, применяют оптические и другие средства. Некоторые из названных методов, в частности электрические, позволяют выявлять динамику расхода по времени или по углу поворота вала двигателя, что особенно ценно при исследовании неустановившихся режимов работы.

Ниже кратко рассмотрены традиционные методы определения расхода воздуха и наиболее распространенные из доступных методов, применяемых в настоящее время.

Устройства для измерения расхода воздуха по указанным выше причинам, как правило, снабжают ресивером, т. е. уравнительным резервуаром, обеспечивающим сглаживание пульсаций потока воздуха, засасываемого в цилиндры. Уравнительный резервуар определенной емкости размещают между испытуемым двигателем и измерительным прибором.

Объем ресивера в большинстве руководств по испытанию поршневых двигателей рекомендуют принимать из расчета не менее 200-кратного объема одного цилиндра испытуемого двигателя. По этой рекомендации объем ресивера для разнотипных двигателей, имеющих

* Газгольдеры [12] не утратили еще своего значения при измерении расхода воздуха в двигателях мотоциклетного типа и картерных газов в четырехтактных двигателях

1 одинаковый литраж, уменьшается по мере возрастания количества цилиндров по кривой гиперболического вида. Рекомендация дает приближенное решение вопроса, поскольку не учитывает тактность и быстроходность двигателей, оказывающих влияние на нужный объем ресивера. На практике эффективность гашения пульсаций потока воздуха повышают тем, что одну из стенок ресивера полностью или частично выполняют из листовой резины. Колебания упругой стенки способствуют сглаживанию пульсаций и одновременно предохраняют ресивер от разрушения в случае воспламенения попавшего в него топлива.

Известны более сложные способы определения минимальных размеров ресивера по частоте пульсаций потока с помощью математического выражения, описывающего неравномерность потока в виде безразмерного параметра [10]. К сожалению, объем ресивера в этом случае наилучшим образом может удовлетворять лишь узкий диапазон скоростных режимов, что не характерно для автомобильных и тракторных двигателей.

Чтобы повысить эффективность гашения пульсаций потока, проходящего через измерительный прибор, часто применяют ресиверы, состоящие из двух емкостей, причем малую из них размещают непосредственно на входе в систему питания двигателя.

Устройства, измеряющие расход воздуха, должны иметь минимально возможное общее сопротивление, причем на номинальных режимах работы двигателя сопротивление их не должно превышать 70—75 мм вод. ст. или согласно новым ГОСТам изменять величины крутящего момента и часового расхода топлива, определенных без указанных устройств, более чем на $\pm 1\%$. Определенные требования предъявляют и к измерению температуры воздуха, поступающего в двигатель. ГОСТ рекомендует размещать термометр на расстоянии не более 100 мм от входа в воздушный фильтр двигателя или в устройство для определения расхода воздуха.

Измерение расхода воздуха путем дросселирования потока в общем случае основано на изменении его параметров при прохождении суженного сечения канала. Для дросселирования каналов применяют нормальные диафрагмы, сопла и трубы Вентури. Будучи установленными в трубопровод постоянного проходного сечения, эти приборы создают сужение трубопровода, при прохождении через которое в потоке возникают местные увеличение скорости и снижение давления, т. е. согласно закону сохранения энергии часть потенциальной энергии давления потока переходит в кинетическую. Поэтому по измеренному перепаду давлений, возникающему в зоне сужения канала, расчетным путем можно определить кинетическую энергию, скорость и, следовательно, расход воздуха, газа или вообще любой сжимаемой и несжимаемой жидкости.

Помимо способа, связанного с дросселированием самого мерного трубопровода, на практике при измерении расхода воздуха широко применяют также способ размещения насадков (дросселирующих приборов), обеспечивающий свободный вход в них непосредственно из окружающей среды [14, 50, 58, 64].

Способ дросселирования мерного трубопровода вследствие громоздкости устройства в настоящее время применяют ограниченно. Поэтому рассмотрим только общие вопросы использования его на примере измерения расхода простейшим из нормальных дроссельных приборов — диафрагмой.

Диафрагму изготовляют в виде тонкой пластины с отверстием диаметром d в центре и устанавливают между фланцами мерного трубопровода, имеющего внутренний диаметр D (рис. VIII.1). На под-

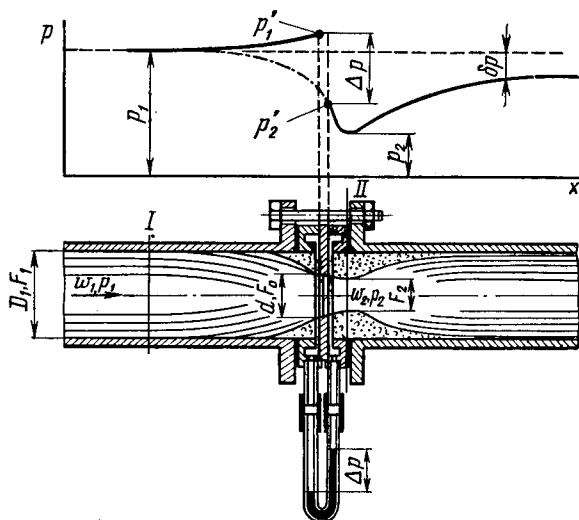


Рис. VIII.1. Схема течения потока и изменение давлений при установке в канал диафрагмы

ходе к диафрагме поток разгоняется, и давление внутри его снижается (см. штрихпунктирную линию на рисунке), а статическое давление на стенке канала перед диафрагмой вследствие искривления линий тока увеличивается. Так как радиальные составляющие скорости перед диафрагмой направлены к оси канала, то, следуя по инерции, поток продолжает сужаться, вследствие чего наименьшее сечение его F_2 получается за пределами диафрагмы. Этому сечению соответствуют наименьшие давления в потоке и на стенки канала за диафрагмой. Далее поток тормозится и снова расширяется до стенок канала.

При торможении потока и расширении его до полного проходного сечения трубопровода скорость потока, соответственно, снижается и часть его кинетической энергии снова превращается в потенциальную энергию давления, однако некоторая ее часть в процессе дросселирования теряется на трение и поглощается вихрями, превращаясь в теплоту. Вследствие этого статическое давление за дроссельными приборами всегда оказывается меньше начального на величину δp (см. рис. VIII.1). Невозвратимую потерю давления определяют по разности давлений в двух сечениях мерной трубы. Одно из них берут на расстоянии $1D$ до диафрагмы, второе — на расстоянии не менее

5D после нее. Важно, чтобы невозвратимые потери давления не повышали общее сопротивление измерительного устройства в больших пределах, чем требуется для получения надежных результатов.

Энергетический баланс потока, отнесенный к 1 кг массы (Дж/кг), при отсутствии трения и дополнительного подвода энергии (или отвода ее) в соответствии с уравнением Бернулли выражается следующим образом:

$$\omega^2/2 + p/\rho + U + Z = \text{const},$$

где $\omega^2/2$ — кинетическая энергия потока газа, движущегося со скоростью ω (м/с); p/ρ — потенциальная энергия давления газа при давлении p (Н/м²) и плотности ρ (кг/м³); U — внутренняя энергия газа, зависящая от абсолютной температуры T (К) и теплоемкости при постоянном объеме c_v ; Z — потенциальная энергия положения, зависящая от перепада уровней и плотности вещества.

Вследствие малой величины плотности воздуха (газа) и незначительного перепада уровней, практически отсутствующего в мерных устройствах, потенциальной энергией положения пренебрегают.

Внутреннюю энергию газа при адиабатном законе изменения его плотности определяют по известному уравнению

$$U = c_v T.$$

Имея в виду уравнение состояния газа и то, что универсальная газовая постоянная $R = c_p - c_v$, а показатель адиабаты $k = c_p/c_v$, где c_p — теплоемкость при постоянном давлении, суммарную работу сил вытеснения, т. е. работу газа за счет статического давления и его внутренней энергии, можно представить так:

$$U + p/\rho = [1/(k-1)](p/\rho) + (p/\rho) = [k/(k-1)](p/\rho).$$

Тогда основное уравнение движения воздуха по каналу мерного устройства принимает вид

$$\omega^2/2 + [k/(k-1)](p/\rho) = \text{const},$$

подтверждающий строгое соотношение между величинами скорости и давления в любом из сечений потока. Следовательно, для принятых двух сечений I и II уравнение баланса энергии потока

$$\omega_1^2/2 + [k/(k-1)](p_1/\rho_1) = \omega_2^2/2 + [k/(k-1)](p_2/\rho_2).$$

Для тех же сечений условие неразрывности потока имеет вид

$$F_1 \omega_1 \rho_1 = F_2 \omega_2 \rho_2 = \varepsilon F_0 \omega_2 \rho_2,$$

где F_0 — площадь отверстия диафрагмы; $\varepsilon = F_2/F_0$ — коэффициент сжатия потока.

Учитывая уравнение баланса энергии потока и условия его неразрывности для принятых сечений, получают следующее уравнение секундного расхода (кг/с) для воздуха, газа и любой сжимаемой жидкости с учетом их расширения:

$$G_B = \mu F_0 \sqrt{2[k/(k-1)] p_1 \rho_1 \left[(p_2/p_1)^{2/k} - (p_2/p_1)^{\frac{k+1}{k}} \right]},$$

где μ — коэффициент расхода.

При небольших местных перепадах давлений $\Delta p = p_1 - p_2$, возникающих обычно в дроссельных устройствах, можно не учитывать расширение потока. Тогда

$$\omega_1^2/2 + p_1/\rho_1 = \omega_2^2/2 + p_2/\rho_2,$$

но поскольку в рассматриваемых условиях плотность вещества сохраняется неизменной, то справедливо

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho,$$

вследствие чего уравнение неразрывности потока примет вид

$$F_1 \omega_1 = F_2 \omega_2 = F_0 \varepsilon \omega_2.$$

Совместное решение приведенных уравнений дает при этом следующие расчетные соотношения для скорости (м/с) и расхода G_v (кг/с):

$$\omega_2 = \varphi \sqrt{2(\Delta p/\rho)},$$

$$G_v = \mu F_0 \omega_2 \rho = \mu F_0 \sqrt{2\rho \Delta p}.$$

Значения $\Delta p = p_1 - p_2$ подставляют в уравнения непосредственно в мм вод. ст., которые измеряют дифференциальным манометром.

Согласно правилам измерения дроссельными устройствами дифференциальный манометр подсоединяют, как показано на рис. VIII.1, измеряя фактически перепад $p'_1 - p'_2$, несколько меньший перепада $p_1 - p_2$. Измерить последний не удастся, поскольку неизвестны точные координаты наиболее узкого сечения потока за диафрагмой, т. е. сечения F_2 . Исходные величины μ , коэффициента расхода μ определяют с помощью таблиц или графиков, составленных по экспериментальным данным с учетом модуля $m = F_0/F_1$ — относительного сужения канала дроссельного устройства и числа Рейнольдса Re , характеризующего режим движения потока [12, 47, 55, 68].

Однако определение расхода воздуха или газа с использованием расчетных формул для несжимаемой жидкости может быть рекомендовано только в тех случаях, когда дроссельное устройство работает в условиях перепада давлений $\Delta p \leq 100$ мм вод. ст. Тогда методические погрешности определения расхода воздуха с учетом и без учета расширения не возрастают более чем на 1% и практически не расширяют общие пределы допускаемой точности измерений. При $\Delta p = 200$ мм вод. ст. дополнительные погрешности составляют уже более 3%.

Конструкция и установка дроссельных приборов для измерения расхода жидкостей и газов нормализованы Правилами 27—54 Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР. К таким приборам Правила относят нормальные диафрагмы, сопла и трубы Вентури, подробно рассмотренные в упомянутой литературе.

Размеры дроссельных приборов находят по установленным для них нормальным соотношениям в зависимости от величины d дросселирующего отверстия. В свою очередь это отверстие предваритель-

но рассчитывают под определенный диапазон расхода воздуха с учетом принятого размера для диаметра D мерного трубопровода. Изготавливают приборы из некорродирующих материалов с повышенной чистотой рабочих поверхностей, с точностью для $d = \pm 0,001 D$ и устанавливают строго соосно с мерной трубой.

Мерную трубу рекомендуется брать внутренним диаметром D не менее 50 мм, так как нормальные дроссельные приборы можно применять без предварительной тарировки при $D = 50 \div 500$ мм.

Рекомендуемое при этом значение $m = 0,4 \div 0,5$ [68], но оно должно быть подкреплено поверочным расчетом в каждом конкретном случае.

Следует также иметь в виду, что исходные величины μ , коэффициента μ в руководствах определены для трубопроводов с гладкой внутренней поверхностью и диафрагм с идеальной острой входной кромкой. На практике эти условия трудно выполнить. Поэтому обязательно вводят коэффициенты k_3 , k_2 и k_1 , учитывающие, соответственно, поправки на недостаточную остроту кромок диафрагмы, на шероховатость труб и вязкость измеряемого вещества [47]. С учетом этих поправок фактический коэффициент расхода

$$\mu = k_1 k_2 k_3 \mu_n,$$

а окончательно проверяют правильность выбора модуля m и диаметра d с помощью графиков, построенных для исходных величин коэффициента μ в функции числа Рейнольдса Re [47].

Безразмерный критерий Рейнольдса, характеризующий режим движения потока,

$$Re = wd/\nu,$$

где w — средняя скорость в расчетном сечении, м/с; d — диаметр дроссельного отверстия (расчетного сечения), м; ν — кинематическая вязкость воздуха, м²/с (табл. VIII.1).

Т а б л и ц а VIII.1

Температура, °С	Значение $\nu \cdot 10^{-6}$, м ² /с	Температура, °С	Значение $\nu \cdot 10^{-6}$, м ² /с
0	13,4	40	17,2
5	13,8	50	18,2
10	14,3	60	19,2
15	14,8	70	20,2
20	15,2	80	21,3
25	15,7	90	22,3
30	16,2	100	23,3

Поскольку из уравнения секундного расхода воздуха (без учета расширения) скорость

$$w_2 = G_B / (\mu F_0 \rho) = 4G_B / (\pi d^2 \rho \mu),$$

то в рассматриваемых условиях число

$$Re = 1,27 [G_B / (\mu d \rho \nu)].$$

В случае $Re < Re_{пред}$, когда $\mu \neq const$, корректируют величину модуля $m = F_0/F_1$ и переходят на дроссельный прибор с меньшим d .

Чтобы обеспечить возможную точность измерений в широком диапазоне расходов воздуха, с которыми приходится иметь дело при испытаниях автомобильных и тракторных двигателей, применяют поэтому набор (комплект) нормальных дроссельных приборов с тщательно рассчитанными размерами и оттарированными именно

под заданные расходы. Для потоков с очень малыми величинами Re рекомендуется применять так называемые сдвоенные диафрагмы, состоящие из двух последовательно размещаемых дроссельных элементов [47].

Общая погрешность метода при оптимальном подборе и эксплуатации нормальных дроссельных приборов составляет 1–2%.

Способ измерения расхода насадками со свободным входом значительно упрощает мерные устройства, основанные на дросселировании, поскольку коэффициент сжатия потока в них $\varepsilon \rightarrow 1$.

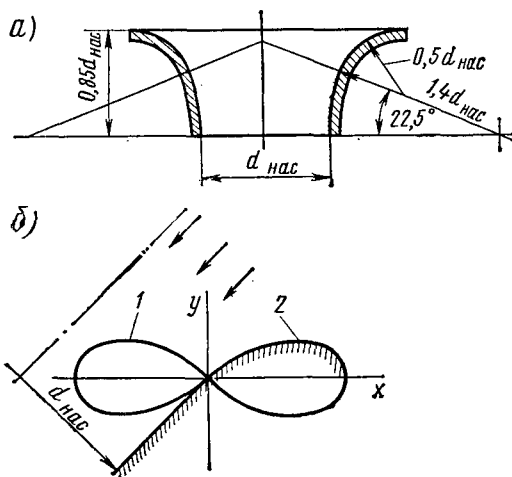


Рис. VIII.2. Коноидальные насадки с входной частью, очерченной дугами окружности (а) и выполненной по лемнискате (б):

1 — кривая, описанная по уравнению лемнискаты; 2 — профиль насадка; $d_{нас}$ — диаметр цилиндрической части насадка

Для указанных целей обычно применяют так называемые *коноидальные насадки*. Входную часть таких насадков очерчивают дугами окружности, как показано, например, на рис. VIII.2, а, придавая ей форму свободно вытекающих (втекающих) струй [64]. Чаще всего вход в цилиндрическую полость насадков профилируют по лемнискате 1 (рис. VIII.2, б), уравнение которой в полярных координатах

$$r^2 = a_n^2 \cos 2\alpha.$$

Профиль такого входа очерчивают по отрезку кривой 2, расположенному в одном из квадрантов, принимая постоянную величину $a_n = (0,6 \div 0,8) d_{нас}$ [53]. Такие насадки называют *лемнискатными*.

Рассматриваемые насадки отличаются достаточно равномерным распределением скоростей по сечению потока в их цилиндрической части [50], поэтому коэффициент сжатия потока в них $\varepsilon = 1$, коэффициент расхода μ достигает величины 0,98 [64], а погрешности измерений ими не превышают 1%. Внутреннюю поверхность насадков тщательно обрабатывают, включая полировку, но ручную доводку не допускают (иначе можно нарушить геометрическую форму

" насадка). При общей длине насадков около $2d_{\text{нас}}$ приемник статического давления размещают на расстоянии, равном примерно $d_{\text{нас}}$ от присоединительного фланца.

Обработка результатов измерений обычная для дросселирующих приборов, но обязательно учитывают предварительную тарировку насадка. Расчет насадков со свободным входом под заданный расход проще расчета приборов, дросселирующих мерную трубу,

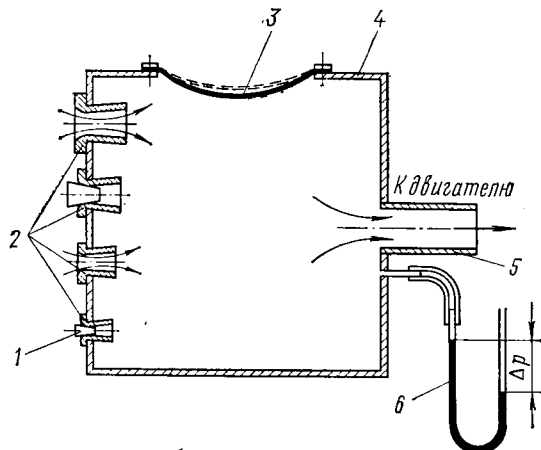


Рис. VIII.3. Схема расходомера, работающего с постоянным установленным перепадом давлений

поскольку модуль $m=1$, а плоскость отсчета можно брать в зоне перед входом, где $w_1 \approx 0$. Вследствие этого искомую скорость можно определять непосредственно из уравнения баланса энергии потока (см. стр. 187).

Насадки коноидального типа обычно применяют в расходомерах, работающих с установленным перепадом давлений, которые широко используют в установках для безмоторных испытаний карбюраторов, фильтров и других узлов двигателей.

Расходомеры с установленным постоянным перепадом давлений представляют собой герметичную емкость, воздух в которую поступает через насадки 2, а отводят его через патрубок 5 (рис. VIII.3). Емкость 4 расходомера одновременно является ресивером, поэтому объем ее подбирают по аналогии с ресивером и так же, как в последнем, одну из стенок снабжают эластичной вставкой 3, чтобы гасить возможное пульсирующее движение потока. В комплект расходомера входит по 9—16 насадков, перекрываемых в нерабочем состоянии резиновыми пробками 1. Насадки заранее тарируют при перепаде давлений $\Delta p = 25$ мм вод. ст. (или 12,5 мм), а в процессе определения расхода открывают столько их, чтобы в емкости 4 при данном расходе воздуха устанавливался принятый перепад давлений Δp , величину которого контролируют с помощью пьезометра 6.

Очевидно, расход (кг/ч) измеряемого воздуха в данном случае равен сумме расходов через действующие насадки:

$$G_B = 0,465 [B_t / (273 + t)] \sum_{i=1}^n V_i,$$

где V_i — объемный расход через работающие насадки, м³/ч; B_t — давление воздуха, мм рт. ст.; t — температура его, °С.

Расходомеры данного типа обеспечивают измерения с точностью $\pm 1\%$.

Измерение расхода воздуха по скоростному напору потока осуществляют с помощью комбинированной пневмометрической трубки, показанной на рис. VI.7, позволяющей определять полные p_{Π} и статические p давления в потоках. По разности этих давлений $\Delta p = p_{\Pi} - p$, т. е. по динамическому напору потока, в выбранных точках находят его скорость (м/с)

$$w_r = \sqrt{2 \Delta p (1/\rho)},$$

где Δp — перепад давлений (мм вод. ст.), отсчитываемый по пьезометру (см. рис. VI.6); ρ — плотность воздуха, кг/м³.

Чтобы исключить влияние возмущений потока, возникающих на входе в мерный трубопровод, трубку размещают в сечении, отстоящем от входа на расстоянии $l \geq 30D$. Величины w_r определяют в 9—11 точках, взятых по диаметру этого сечения, при различных расходах воздуха и строят поля скоростей в координатах $w_r - r$, где r — выбранный радиус сечения, м. Далее

рассчитывают среднюю скорость w . На рис. VIII.4, а показаны поля скоростей при различных скоростных режимах n_1 и n_2 (об/мин) работы двигателя для мерного трубопровода радиусом $R = D/2 = 0,0253$ м.

Среднюю скорость потока можно определять методом графического интегрирования скоростного поля. Для трубопровода круглого сечения эта скорость

$$w_{\text{ср}} = (2/R^2) \int_0^R w_r r dr,$$

где R — радиус трубопровода, м; dr — ширина элементарного кольца.

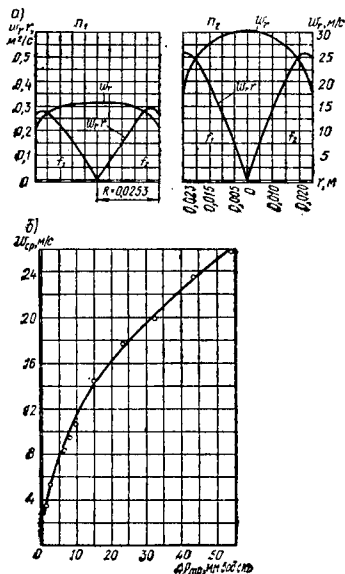


Рис. VIII.4. Поля скоростей, замеренные в трубопроводе $D=50,6$ мм при различных n (об/мин) (а) и величины средней скорости $w_{\text{ср}}$ воздуха в зависимости от перепада давлений $\Delta p_{\text{тр}}$ в центре потока (б)

Интеграл $\int_0^R \omega_r r dr$ определяют как площадь $F = (f_1 + f_2)/2$ (мм²), ограниченную кривой, построенной в координатах ω_r и r (рис. VIII.4, а), поэтому расчетное уравнение принимает вид

$$\omega_{\text{ср}} = (2/R^2) F \kappa,$$

где κ — масштаб площади диаграммы, м³/с в мм².

По данным расчета строят график $\omega = f(\Delta p_{\text{тр}})$, где $\Delta p_{\text{тр}}$ — динамический напор по оси потока в расчетном сечении, взят по цент-

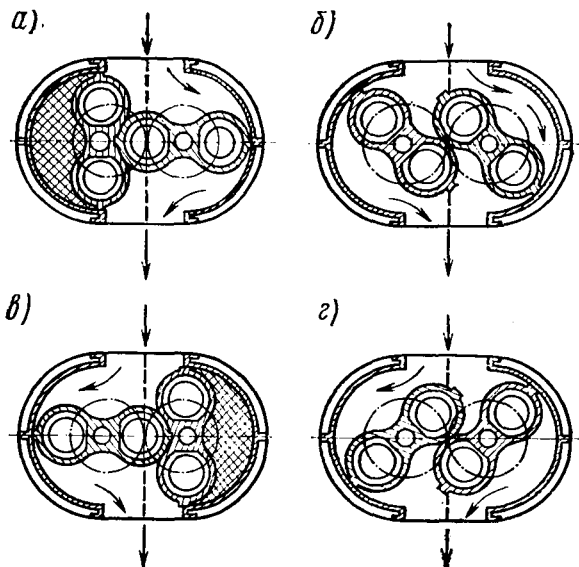


Рис. VIII.5. Ротационный газовый счетчик типа РГ;

а+г — положения роторов в процессе работы

ру мерной трубы (рис. VIII.4, б) и с его помощью определяют ω , а следовательно, и расход воздуха при последующих измерениях.

Известны и другие способы обработки результатов измерения расхода воздуха пневмометрическими трубками [55]. Метод соизмерим с измерением расхода путем дросселирования потока как по точности, так и громоздкости мерного трубопровода.

Измерение расхода воздуха газовыми счетчиками — наиболее простой, сравнительно точный и удобный способ непосредственного определения суммарного объема воздуха, потребляемого двигателем на установившихся режимах работы, поэтому и самый распространенный в настоящее время. При испытании тракторных, автомобильных и даже мотоциклетных двигателей, как правило, применяют ротационные счетчики типа РГ, производительностью 25–1000 м³/ч и более. Конструкция и принцип работы счетчика показаны

на рис. VIII.5, а — г; основные технические данные приведены в табл. VIII.2.

В чугунном корпусе счетчика расточена общая фигурная полость в виде двух полуцилиндров с параллельными осями, в которой во взаимно перпендикулярном положении размещены роторы восьмеричной формы. Оси роторов опираются на шариковые подшипники, вмонтированные в торцовые крышки корпуса, и связаны между собой двумя парами синхронизирующих шестерен. Такая кинематическая связь позволяет снижать до минимума зазор в зубчатых зацеплениях и сохраняет его постоянным во всех положениях роторов.

К оси одного из роторов через магнитную муфту и редуктор подсоединен счетный механизм с цифровыми роликами. Передаточное отношение редуктора подобрано так, что счетный механизм показывает объем прошедшего через счетчик газа (воздуха) непосредственно в кубометрах.

Для контроля за потерей напора счетчик снабжен дифференциальным манометром. В счетчиках типа РГ стеклянные трубки манометра соединены с верхним входным и нижним патрубками корпуса через мембранные клапаны, обычное положение которых закрытое. Для наблюдения за работой счетчика головки клапанов оттягивают и поворачивают на 90°; разность уровней воды в трубках показывает величины сопротивления счетчика, нормы которых приведены в табл. VIII.2.

Таблица VIII.2

Показатели	Ротационные счетчики					
	РГ-40-1	РГ-100-1	РГ-250-1	РГ-400-1	РГ-600-1	РГ-1000-1
Номинальный расход, м ³ /ч	40	100	250	400	600	1000
Наименьший расход, м ³ /ч	4	10	25	40	60	100
Порог чувствительности (не более), м ³ /ч	0,6	1,5	3,75	6,0	9,0	15
Потеря напора при номинальном расходе (не более), мм вод. ст.	30	30	30	30	30	30
Погрешность показаний на расходах, %, при:						
10÷20% от номинального	±3	±2	±2	±2	±2	±2
20÷120% от номинального	±1,6 и ±2,5	±1,0 и ±1,6	±1,0 и ±1,6	±1,0 и ±1,6	±1,0 и ±1,6	±1,0 и ±1,6
Передаточное отношение к счетчику, i	360	84	235,95	140,4	72	37,12

При работе счетчика вращение роторов происходит за счет разности давлений на входе в него и выходе, возникающей вследствие движения потока воздуха, засасываемого в цилиндры двигателя. Мерный объем счетчика образуется двумя полостями, заключенными между внутренними стенками корпуса и роторами (рис. VIII.5, а — в).

Когда одна мерная полость соединяется с выходным патрубком счетчика, другая полость заполняется воздухом (газом). И так непрерывно, за каждый оборот роторов дважды происходит наполнение мерных полостей и дважды — выталкивание из них воздуха.

Точность измерения определяется тщательностью изготовления деталей, образующих мерные полости счетчика, величиной зазора между роторами и корпусом, который не должен превышать 0,05 мм, а также легкостью вращения роторов. Величины погрешностей при работе с различными расходами приведены в табл. VIII.2. Погрешность счетчиков типа РГ, производимостью 100 м³/ч и более, в зоне рабочих расходов, т. е. 20÷120% от номинального, не превышает ±1,6%; погрешность старой модели счетчиков РС составляла соответственно ±2%. Счетчики допускают 20% перегрузки, а температура воздуха (газа), проходящего через них, может быть 0÷+50°С.

При использовании указанных счетчиков в лабораториях двигателей их счетный механизм с цифровыми роликами, предназначенный для визуального отсчета расхода, целесообразно заменять на импульсный электромеханический с контактным датчиком (прерывателем), который устанавливают на ось одного из роторов. Но предпочтительнее применять электронные счетчики, например типа ЕСА-3, с бесконтактным фотоэлектрическим или иным датчиком. С этой целью на ось ротора устанавливают тонкий непрозрачный диск с одной, но лучше с несколькими прорезями или легкую двухлопастную вертушку.

Замена механического счетного устройства импульсным счетчиком числа оборотов роторов позволяет вести дистанционное наблюдение за расходом воздуха и одновременно автоматизировать отсчет, что значительно повышает точность, в чем можно убедиться, например, по тарировочному графику (рис. VIII.6).

Производительность (м³/ч) газового счетчика типа РГ, оснащенного импульсным счетчиком числа оборотов ротора,

$$V_B = (\Delta V / i) (n_{\text{имп}} / \tau) 3600,$$

где ΔV — объем воздуха (газа), проходящего через счетчик за один полный оборот цифрового ролика механического счетного устройства, отсчитывающего минимальные для данного газового счетчика объемы, м³; i — передаточное число редуктора к роликовому счет-

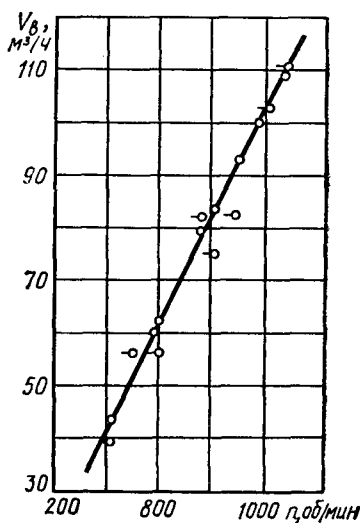


Рис. VIII.6. Тарировочный график газового счетчика с фотоэлектрическими датчиками измерения числа оборотов роторов и роликовым счетным механизмом

○ — замер по импульсному датчику; —○— замер с роликовым счетным механизмом

ному механизму; $n_{\text{имп}}$ — число импульсов, фиксируемое электрическим счетчиком; τ — время отсчета, с.

Отношение $\Delta V/i$ представляет собой измерительный объем и для данного газового счетчика величина постоянная. Ее легко подсчитать, поскольку на фирменной дощечке каждого счетчика обязательно указывают величину i (см. также табл. VIII.2). Обозначая эту постоянную величину через a , получим ($\text{м}^3/\text{ч}$)

$$V_{\text{в}} = a (n_{\text{имп}}/\tau)/3600,$$

или, при длительности замеров $\tau = 30$ с,

$$V_{\text{в}} = 120 a n_{\text{имп}}.$$

Точность рассматриваемых газовых счетчиков повышается с увеличением загрузки, поэтому измерительное устройство целесообразно

оснащать двумя газовыми счетчиками лучше разной производительности. Тогда их более эффективно можно использовать и порознь и вместе. При наличии электронных цифровых регистрирующих приборов это не осложняет наблюдений за расходом воздуха.

Электрические средства измерения расхода воздуха позволяют выявлять даже динамику расхода во времени или изменению угловой скорости вращения вала двигателя, что необходимо бывает при исследовании, например, неуставившихся режимов работы. На практике широко применяют так называемые тепловые, в частности калориметрические, расходомеры [29, 58], но чаще всего используют возможность термоанемометров.

Термоанемометры основаны на использовании за-

кономерности теплообмена между подогреваемой током провололочкой (нитью) и потоком воздуха (газа, жидкости), охлаждающим эту нить. Чем больше нить отдает тепла, тем ниже ее температура, меньше сопротивление и, следовательно, больше бывает величина скорости обдува потоком.

Зависимость между теплом Q_t , теряемым в единицу времени провололочкой (нитью), находящейся при температуре $t_{\text{пр}}$ выше температуры воздуха $t_{\text{в}}$, и скоростью w обдува ее определяют из соотношения

$$Q_t = \lambda l (t_{\text{пр}} - t_{\text{в}}) (1 + k \sqrt{w/\lambda}),$$

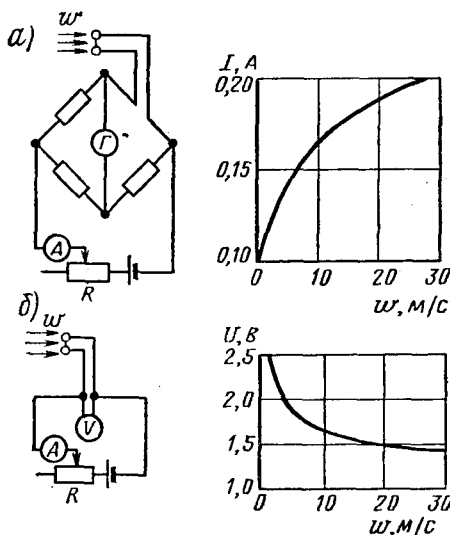


Рис. VIII.7. Включение термоанемометров в измерительную цепь:

а — по методу постоянного сопротивления;
б — по методу постоянной силы тока;
А — амперметр; V — вольтметр; R — переменное сопротивление; Г — гальванометр

где $k = \sqrt{2\pi r c_p d}$ — коэффициент; λ и ρ — теплопроводность и плотность воздуха; c_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении; d и l — диаметр и длина проволоочки.

Термоанемометры служат в основном для измерения скорости потоков, что и позволяет определять расход воздуха (жидкости).

Известны две группы рассматриваемых приборов. В первой — нагреваемую тоненькую проволочку включают непосредственно в измерительный мост в качестве одного из его плеч, как показано на рис. VIII.7, и измеряют при этом силу тока при постоянных сопротивлении и температуре проволоочки (рис. VIII.7, а). Во второй — измеряют сопротивление проволоочки при постоянной силе тока (рис. VIII.7, б), а температуру самой проволоочки (нити) определяют с помощью термпар и термисторов (см. гл. VII). Приборам второй группы свойственна большая инерционность [29].

Чувствительный элемент термоанемометров выполняют из платиновой, вольфрамовой и реже никелевой проволоки диаметром 0,005—0,3 и длиной 3—20 мм. Приборы с меньшим диаметром проволоочки менее инерционны, но последняя имеет меньшую прочность и интенсивнее стареет. Чувствительность прибора повышается с увеличением температуры нагрева проволоочки, уменьшается при этом и влияние возможных колебаний температуры ее нагрева, но из-за опасения нарушить структуру чувствительного элемента нагрев его ограничивают 400÷500°С.

Блок-схема типичного термоанемометра показана на рис. VIII.8, а. Нить 1 из вольфрамовой проволоочки диаметром 0,009 мм, служащая для измерения скорости потока, укреплена в специальной державке 3, а позади ее расположена малоинерционная термopара 2, измеряющая температуру потока. Сила тока, протекающего через измерительную нить термоанемометра, почти не зависит от сопротивления последней благодаря введению в схему дополнительного сопротивления R . Разность напряжений на концах нити, зависящая от скорости потока, усиливается звеном $У$ и подается на регистрирующую часть прибора РП. Сила тока в измерительной нити термоанемометра при нормальных температурных условиях составляет 100 мА [29].

Однако в нестационарных потоках в обдуваемой им проволочке возникает некоторая неравномерность распределения температуры по ее радиусу, что порождает погрешности измерений вследствие неодинаковости удельного сопротивления отдельных слоев проволоочки. Еще большие затруднения возникают в случаях измерения параметров среды в отдельных полостях двигателей внутреннего сгорания.

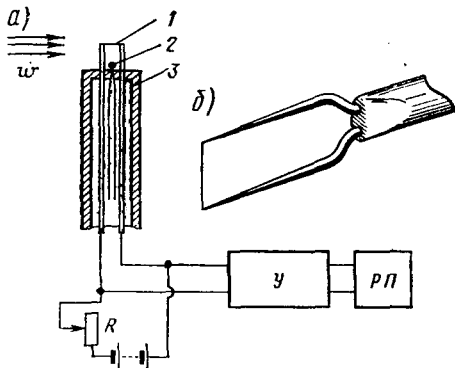


Рис. VIII.8. Блок-схема термоанемометра (а) и общий вид его датчика (б)

Например, в камерах сжатия, когда на показания термоанемометров влияют не только скорость движения и температура рабочего тела, но и давление. Поэтому в таких специфических условиях применяют более сложные термоанемометры с температурной компенсацией типа ЭТА-5А конструкции Всесоюзного электротехнического института им. В. И. Ленина.

Электротермоанемометр ЭТА-5А, упрощенная принципиальная схема которого представлена на рис. VIII.9, *а*, состоит из трех от-

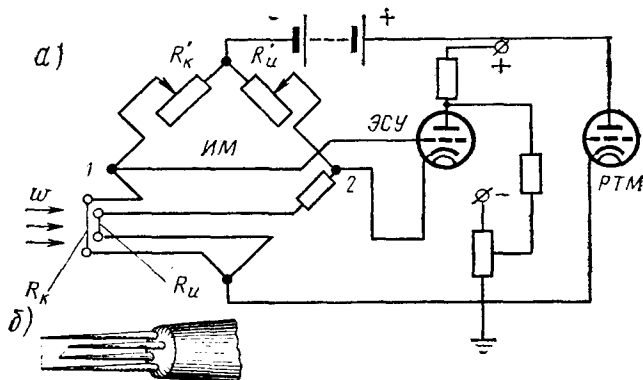


Рис. VIII.9. Принципиальная упрощенная схема электротермоанемометра ЭТА-5А (*а*) и конструкция двухнитевого датчика (*б*)

дельных блоков: измерительного моста ИМ; высокостабилизированного усилителя постоянного тока ЭСУ и электронного регулятора тока моста РТМ. Две вольфрамовые нити датчика, измерительная и компенсационная, обладающие сравнительно большим электрическим температурным коэффициентом сопротивления, включены в измерительный мост в качестве его плеч. Первая из них R_u имеет диаметр 19 мкм и длину 4,5 мм; вторая R_k — соответственно 23 мкм и 9 мм. Ножки нитей выполняют из манганина диаметром 0,5 мм (рис. VIII.9, *б*).

Величину настраиваемых плеч R_u и R_k измерительного моста подбирают из расчета, чтобы первоначальная установочная температура измерительной нити составляла 150° С, а компенсационная имела 40° С. В этом случае мост находится в сбалансированном состоянии и потенциалы в точках 1 и 2 равны. При обдуве датчика воздухом измерительная нить, имеющая большую температуру, охлаждается интенсивнее компенсационной, что вызывает разбаланс моста в связи со скоростью движения среды. Для восстановления нарушенного баланса моста служат усилитель ЭСУ, имеющий коэффициент усиления $K=12000$ и линейную характеристику в интервале частот 30 Гц ÷ 150 кГц, и регулятор тока моста РТМ. Поскольку выход усилителя ЭСУ связан с входными сетками РТМ, то в случае возникновения разбаланса ИМ потенциал последних изменяется, соответственно изменяются и значения тока питания измерительного

моста. Таким образом, датчик прибора оказывается включенным в замкнутую быстродействующую цепь регулирования.

Если элементы датчика и цепи регулирования, а также настройка их выбраны так, что в процессе конкретных измерений баланс измерительного моста сохраняется независимо от температуры измеряемой среды, то прибор обеспечивает измерение скоростей как стационарных, так и нестационарных потоков, для регистрации которых используют осциллограф, подключаемый к клеммам термоанемометра.

Термоанемометры типа ЭТА-5А позволяют проводить и особенно сложные исследования скоростных полей в цилиндрах и камерах сгорания двигателей. В последнее время для этой цели применяют также ионоанемометры, описанные в литературе [43].

§ VIII. 3. Измерение расхода топлива

Особенности измерения расхода топлив автомобильными и тракторными двигателями характерны тем, что часовой расход их составляет всего 20—50 кг на режимах полных нагрузок и снижается до 0,5—2,0 кг на холостом ходу. Это создает определенные трудности при измерении расхода как жидких, так и газообразных топлив, которые приходится поэтому измерять или путем взвешивания, или с помощью мерных емкостей. На практике применяют также различные расходомеры — ротаметры и флоуметры, а на неустановившихся режимах — электрические средства измерений.

Расходомеры не обладают нужной точностью, но позволяют визуально определять интенсивность расхода в данный момент времени, что облегчает настройку двигателя на заданный режим.

Из способов определения суммарного расхода топлива наибольшей точностью обладает взвешивание, которое в основном применяют для дизельных и газовых топлив.

Объемный способ в обычном исполнении с открытыми емкостями и ручным управлением относится к простейшим и широко применя-

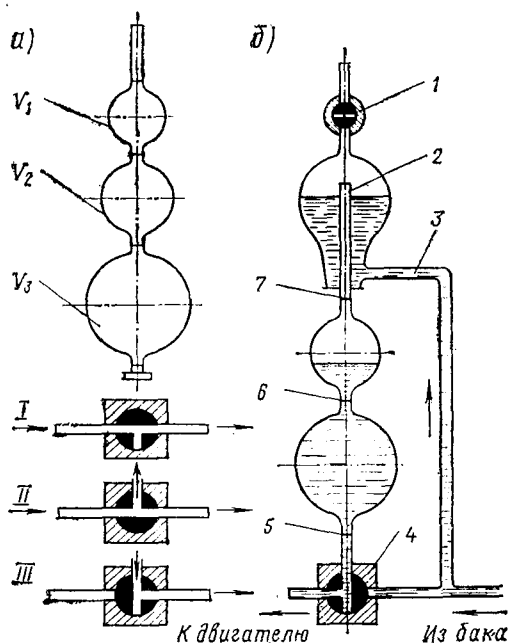


Рис. VIII.10. Мерные емкости:
а — открытые; б — закрытые

ется на практике. Основу его составляют стеклянные мерные емкости разного объема, соединяемые между собой узкими протоками, как показано на рис. VIII.10, а. Нижнюю из них делают относительно большого объема, а верхнюю — малого, рассчитанную на режимы холостого хода двигателя. При тарировке мерных объемов на шейках между ними наносят риски (отметки). Объем, заключенный между рисками, отделяющими соседние мерные объемы, определяют с точностью до $0,1 \text{ см}^3$. Суммарный объем между крайними рисками прибора выбирают из условий максимального возможного расхода топлива испытуемым двигателем за время 30—60 с. Чтобы исключить возможность переливания топлива при заполнении верхнего мерного объема, на выходную трубку его надевают резиновый бензостойкий шланг и выводят последний на уровень заливной горловины топливного бака.

Мерные емкости выполняют шарообразными или любой другой геометрической формы, но обязательно с узкими переходами между ними. Это резко увеличивает скорость протекания топлива в зоне рисков и позволяет с большей четкостью фиксировать момент прохождения топливом контрольных рисков. К топливопроводу, идущему от бака к двигателю, емкости подключают с помощью трехходового крана, схематично показанного на рис. VIII.10, а. В положении *I* топливо из бака поступает непосредственно к двигателю; в положении *II* — одновременно заполняет мерные емкости и питает двигатель; в положении *III* крана бак отключен, и двигатель питается из мерного прибора. Идет замер расхода топлива, после чего прибор вновь заполняют до нужного уровня, несколько превышающего контрольную риску начала отсчета времени при замерах.

Поскольку мерные объемы известны, то, измерив секундомером или другим отсчетным устройством время расхода топлива из принятого объема, путем расчета определяют часовой расход его (кг/ч)

$$G_r = 3,6 (\Delta V \rho_r / \tau),$$

где ΔV — объем одной или нескольких мерных емкостей, см^3 ; ρ_r — плотность топлива, г/см^3 ; τ — время расхода всего топлива из мерной емкости, с.

При расчете следует учитывать действительную плотность топлива, измеряемую, например, с помощью ареометра, и вносить поправки на изменение температуры окружающей среды.

Измерение расхода топлива открытыми емкостями имеет тот недостаток, что в случае подачи топлива самотеком последние следовало бы устанавливать над двигателем на высоте 3—4 м, обеспечивающей требуемое давление подачи $0,2\text{—}0,3 \text{ кгс/см}^2$ ($\approx 0,02\text{—}0,03 \text{ МН/м}^2$). Такое размещение прибора неудобно для наблюдений и практически не осуществимо. Обычно емкости закрепляют на уровне глаз наблюдателя, вследствие чего напор подачи составляет менее 1 м и недостаточен для нормальной работы системы питания двигателя, особенно на режимах больших и полных нагрузок. Поэтому открытый мерный прибор подключают к двигателю через подкачивающий

насос (помпу) или же применяют объемные мерные приборы закрытого типа, так называемые штихпроберы.

Штихпроберы позволяют поддерживать в системе подачи давление, равное напору столба, соответствующего высоте расположения топливного бака относительно двигателя как до, так и в процессе измерения. При этом запаздывание с переключением питания на бак не приводит к прекращению питания двигателя и его остановке, как нередко случается при работе с открытыми емкостями.

Устройство штихпробера схематично показано на рис. VIII.10, б. От обычных открытых мерных емкостей он отличается наличием промежуточной емкости, которая размещена над мерными так, что в нее входит трубка 2 от верхней малой емкости, а трубкой 3 она соединена непосредственно с топливным баком. Поскольку с помощью промежуточной емкости регулируют заполнение мерных емкостей, то она снабжена еще краном 1 для выпуска воздуха из системы. В систему подачи топлива штихпробер включают через трехходовой кран 4 или через два обычных крана.

На рисунке штихпробер показан в положении замера. По мере расхода топлива из мерных емкостей такое же количество его по трубке 3 поступает в промежуточную емкость из бака, поэтому в процессе измерения давление над уровнем топлива в мерных емкостях не изменяется. При заполнении штихпробера вместе с трехходовым краном 4 открывают кран 1 и как только топливо заполнит некоторую часть регулировочного объема, кран 1 закрывают. В результате этого воздух над топливом по мере заполнения мерных емкостей сжимается, пока давление в них не становится равным напору из бака. Если при этом уровень топлива в мерных емкостях окажется ниже отметок 6 или 7 (смотря по тому, какая емкость принята для измерения), то посредством крана 1 воздух стравливают до тех пор, пока соответствующая отметка не окажется ниже уровня топлива. Штихпробер готов к замеру. В случае несвоевременного переключения крана 4 в положение *Из бака*, т. е. после того как уровень топлива минует отметку 5, оно вновь начинает поступать в прибор через трубки 3 и 2, и питание двигателя не прекращается.

Точность измерения расхода топлива объемным способом при ручном управлении зависит от опыта испытателей. Запаздывание или опережение нажатия головки секундомера относительно момента прохождения топливом контрольных меток вызывает ошибку в отсчете. Случайные погрешности возникают и вследствие неверного направления луча зрения наблюдателя по отношению к контрольным отметкам рабочей емкости, причем величина ошибок возрастает с уменьшением объема мерной емкости. К недостаткам объемного способа с ручным переключением кранов относятся также трудности, возникающие с переходом на дистанционное управление.

Однако перечисленные недостатки легко устраняют с помощью фотоэлектрических датчиков, которыми оснащают современные системы с мерными емкостями. Датчики устанавливают так, что в момент прохождения топливом нужных контрольных рисков в измерительную цепь мерного устройства посылаются соответствующие

сигналы, которые используют для управления электрическим секундомером. Такие автоматизированные системы на любой дистанции от прибора обеспечивают выбор нужной для измерения емкости, своевременное ее заполнение по окончании замера и т. д.

Примером может служить автоматизированный цифровой прибор японской фирмы «Оно-сокки», показанный на рис. VIII.11, а, б,

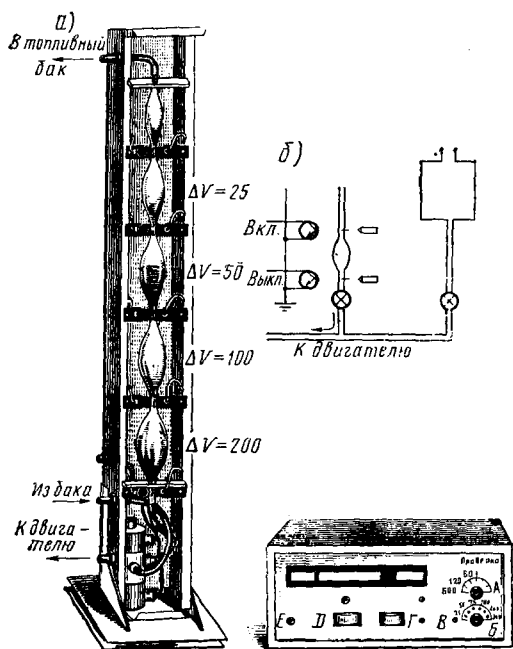


Рис. VIII.11. Мерные емкости с автоматизированным дистанционным управлением японской фирмы «Оно-сокки»:

а — общий вид с пультом управления; б — принципиальная схема

который позволяет определять не только время расхода заданного объема топлива, но также обороты вала двигателя с помощью одного и того же счетного электронного устройства, индикатор которого состоит из пяти счетных цифровых ламп тлеющего разряда типа ИН-1. Изменяя положение переключателя А, можно вести счет секундам при измерении расхода топлива или числу оборотов вала двигателя в промежутках между этими измерениями, используя датчик оборотов МР-6, что создает определенные удобства в работе.

Прибор снабжен четырьмя различными по величине мерными емкостями (25, 50, 100 и 200 см³), отгарированными с точностью 1% и подключенными к электромагнитному охлажда-

емому водой клапану, управляемому со специального переносного пульта с помощью системы, включающей пять фототранзисторов, установленных около горловин мерных емкостей, как показано на рисунке. Нужный мерный объем, выбираемый из одной или двух емкостей, задают переключателем Б. Прибор питают от сети 220 В, а в работу включают тумблером Е.

Кнопку В пуска можно нажимать только после того, как стрелка контрольного индикатора Д переместится с красного поля на нулевую отметку и загорается сигнальная лампа Г готовности прибора. Первое нажатие кнопки сбрасывает результаты предыдущего измерения, а после повторного нажатия начинается новый отсчет. Если по каким-либо причинам эту кнопку нажимают до завершения замера, то подготовительный цикл выполняется автоматически и вновь должна загораться контрольная лампа.

Для перехода на измерение числа оборотов вала переключатель *А* переводят на одну из отметок 60÷600 и двумя последовательными нажатиями на кнопку пуска включают прибор в работу, причем в зависимости от выбранной позиции 60, 120 или 600 время стробирования (повторение счета), соответственно, составляет 1; 0,5 или 0,1 с.

Перед началом работы рекомендуется проверять исправность счета. Для этого переключатель *А* переводят на отметку *Проверка*. А поскольку стандартную частоту сигналов в приборе получают от генератора с кварцевой стабилизацией на 10 000 Гц, то в случае исправного действия счетного устройства на всех четырех лампах индикатора должны быть нулевые индексы.

Однако объемные способы измерения нельзя применять для дизельных топлив, которые вследствие присущей им маслянистости трудно стекают со стенок емкостей, что увеличивает погрешности измерений.

Способ взвешивания исключает необходимость определения плотности топлива перед началом испытаний и последующего введения поправки, учитывающей изменение температуры

окружающей среды, поскольку эти изменения автоматически фиксируются в процессе измерения. Сущность этого способа можно уяснить по элементарной схеме взвешивающего устройства (рис. VIII. 12).

Для взвешивания расходуемого топлива можно использовать обычные циферблатные весы со смешанным рычажно-маятниковым механизмом. На одну их чашку устанавливают стеклянный сосуд под топливо, а на вторую — уравнивающие гири. Сосуд *3* соединен с баком *1* через трехходовой кран *4*, который позволяет переключать питание двигателя либо непосредственно из бака *1*, либо из мерного сосуда *3*. На рисунке VIII.12 показано положение, когда топливо из бака поступает к двигателю и одновременно заполняет мерный сосуд *3*.

После заполнения мерного сосуда кран *4* переключают на питание из бака, а на правую чашку весов ставят гири из расчета, чтобы левая чашка с мерным сосудом немного перевешивала чашку с гирями. Для замера кран *4* переключают в положение питания из мерного сосуда и как только весы приходят в равновесие, о котором судят по положению стрелки весов *2*, включают секундомер. Одновременно с правой чашки весов снимают нужную гирю, вследствие чего левая чашка с мерным сосудом вновь опускается. В момент израсходования количества топлива, равного массе снятой гири, весы опять приходят в равновесие и секундомер останавливают.

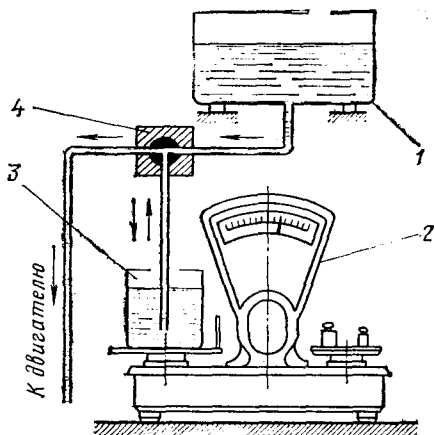


Рис. VIII.12. Схема весового устройства для определения расхода топлива

Отсчет по секундомеру показывает время τ (с), за которое из мерного сосуда израсходовано ΔG_τ топлива. Часовой расход (кг/ч) топлива

$$G_\tau = 3,6 (\Delta G_\tau / \tau).$$

Далее мерный сосуд заполняют для следующего замера.

Способ взвешивания с ручным управлением в настоящее время почти полностью вытеснен автоматическими устройствами, в которых

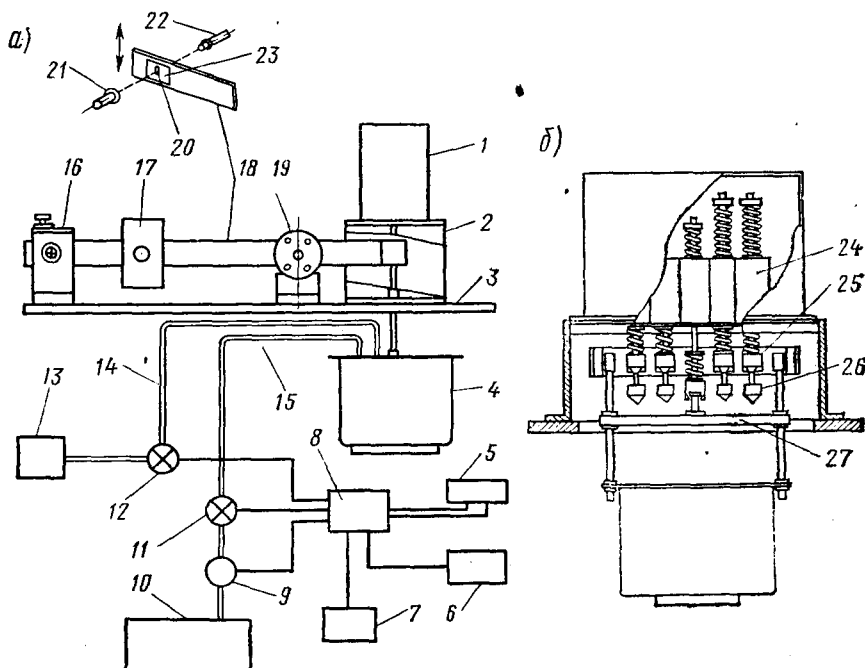


Рис. VIII.13. Взвешивающее автоматизированное мерное устройство японской фирмы «Оно-сокки»:

a — блок-схема; *б* — взвешивающее устройство

все операции выполняют электрические и электронные системы, управляемые на расстоянии. Примером современного взвешивающего устройства, предназначенного для измерения расхода топлива, может служить устройство модели FW-100A японской фирмы «Оно-сокки» (рис. VIII.13, *a*, *б*).

Основу его составляют рычажные весы, размещенные в корпусе 2. Коромысло 18 весов совершает качательные движения около шарнирной опоры 19, закрепленной на базовой плите 3. К короткому плечу коромысла подвешен мерный сосуд 4, а на длинном — размещены балансирующая масса 17 и пластина 23 с щелью 20 для фотоэлектрического датчика, состоящего из фоторезистора 22 и лампы 21, вмонтированных в стойку 16. В верхней части 1 корпуса размещен ряд соленоидов 24 с захватами 25, которые в зависимости от положения переключателя 6 на пульте управления 8 опускают и поднимают

с площадки 27, заблокированной с мерным сосудом 4, соответствующую контрольную гирию 26.

В мерный сосуд 4 введены две трубки: 14 соединяет сосуд с испытуемым двигателем 13, а 15 — с основным баком 10. Заполнение системы топливом и замеры производят с помощью насоса 9 и электромагнитных кранов двухходового 11 и трехходового 12, которые автоматически срабатывают в зависимости от режима, устанавливаемого оператором. Если при включении прибора измерительная цепь находится в рабочем состоянии, то загорается контрольная лампочка на панели пульта управления. Перед замером переключатель 6 ставят в одну из шести его позиций сообразно с размером навески, выбранной для измерения, а пусковой переключатель — в положение замера. По окончании заполнения мерной емкости и завершения подготовки к замеру загорается вторая контрольная лампа — прибор готов к работе. Команда к замеру подается нажатием на пусковую кнопку.

Мерное устройство оснащено электронным секундомером, основанным на десятично-двоичной системе отсчета частоты колебаний генератора с колебательным контуром и цифровым индикатором 5, показывающим время $0,1 \div 999,9$ с. Сигналы к началу и окончанию отсчета времени поступают от фотоэлектрического датчика. Сигналы этого датчика используют также для управления соленоидами кранов 12 и 11 и топливным насосом 9. За правильным функционированием цепи фотодатчика наблюдают по показаниям контрольного прибора 7, стрелка которого при норме должна устанавливаться на красном поле шкалы.

Перед началом работы делают пробные замеры с целью удаления воздуха из системы. Переключатель пуска ставят при этом в положение проверки, а по окончании ее переключатель вновь переводят в положение замера.

При выключенном измерителе расхода топливо поступает к двигателю через трехходовой кран 12 из основного бака 10, и балансирная масса 17 измерителя опущена. Поэтому, как только измерительное устройство включают в силовую сеть, свет от лампы 21 начинает падать на фоторезистор 22, по электрическому сигналу от которого включается насос 9 и открывается кран 11. В результате топливо из бака 10 поступает также в мерную емкость 4. По мере ее заполнения балансирная масса поднимается, а в момент пересечения рычага 18, несущего массу, с пучком света от лампы 21 цепь фоторезистора 22 выключается. Это служит сигналом к выключению насоса и закрытию крана 11. Однако в процессе переключения крана топливо продолжает поступать, и емкость заполняется с некоторым избытком против необходимого для равновесного состояния весового механизма, причем щель 20 оказывается выше луча света, падающего от лампы 21.

При нажатии стартовой кнопки кран 12 отключает бак 10 и переводит питание на мерную емкость. Вследствие расхода топлива последняя начинает подниматься, а балансирная масса вновь опускаться. Как только свет от лампы через щель попадет на фоторезистор,

что соответствует равновесному состоянию весового механизма, подается сигнал на начало отсчета времени и на один из соленоидов 24, который опускает гирию на площадку 27. Под действием гири мерный сосуд вновь опускается, а рычаг 18 с балансирной массой 17 поднимается и прерывает световой поток, идущий от лампы к фоторезистору. По мере расходования топлива из мерной емкости 4 последняя поднимается, а балансирная масса 17 опускается. В момент повторного

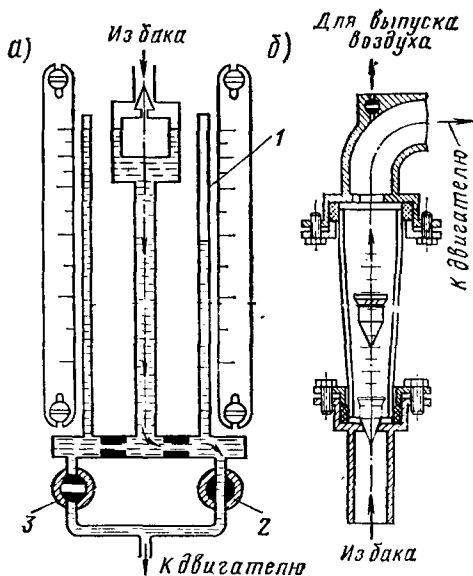


Рис. VIII.14. Схемы флуометра (а) и ротаметра (б)

совпадения щели с лучом света от лампы свет попадает на фоторезистор, и в измерительную цепь поступает сигнал на прекращение замера.

Одновременно кран 12 переводит питание двигателя из основного бака 10, соленоиды 24 снимают контрольную гирию автоматически, открывается также кран 11 и включается насос 9. Мерная емкость заполняется для последующего замера расхода топлива. Цифровой индикатор 5 показывает время (в с), за которое было израсходовано топливо, равное массе контрольной гири. Часовой расход подсчитывается по обычной формуле.

Описанное взвешивающее устройство пригодно для определения расхода как бензина, так и дизельного топлива. Точ-

ность взвешивания составляет $\pm 0,5\%$.

Флуометр в простейшем исполнении показан на рис. VIII.14, а. Основу его составляют напорная трубка с поплавковым устройством, поддерживающим в ней определенный уровень, мерные стеклянные трубки с отсчетной шкалой и калиброванные соединительные каналы (жиклеры), расположенные в горизонтальной трубке между напорной и мерными трубками.

Топливо из бака поступает в поплавковую камеру и в напорную трубку, откуда через калиброванные отверстия (жиклеры) проходит в мерные трубки 1, верхний обрез которых выведен выше уровня топлива в поплавковой камере. Через краны 2 и 3 топливо подводится к двигателю, проходя при этом соответствующее калиброванное отверстие. Вследствие этого возникает потеря напора, и уровень топлива в мерных трубках понижается относительно уровня в поплавковой камере. А так как потеря напора зависит от скорости истечения топлива через калиброванные отверстия, то чем больше расход топлива, тем ниже опускается уровень в мерных трубках.

На шкале мерных трубок при тарировке наносят деления, соот-

ветствующие обычно расходу топлива в литрах в час. Тарировку проводят на определенном топливе при заданной температуре, поэтому изменения плотности или вязкости топлива вносят неизбежные погрешности в измерения. Это и ограничивает применение флоуметров.

Ротаметры представляют собой поплавковые измерительные приборы, устройство и принцип действия которых можно уяснить из схемы, показанной на рис. VIII.14, б. Прибор состоит из стеклянной трубки конической формы и помещенного в нее поплавка.

При пользовании прибором топливо из бака поступает в нижнюю суженную часть трубки, а к двигателю выходит через верхнюю, более широкую ее часть. Так как поплавок имеет несколько бóльшую массу, чем масса вытесняемого им топлива, то он стремится опуститься вниз, а протекающее топливо приподнимает его. Чем больше протекает топлива по конической трубке, тем на большую высоту поднимается поплавок.

Высота подъема поплавка определяется перепадом давления Δp , образующегося вследствие протекания топлива через кольцевой зазор между поплавком и коническими стенками трубки. В результате возникает усилие, поднимающее поплавок до тех пор, пока кольцевой зазор не достигнет размера, при котором усилие, действующее снизу на поплавок, будет лишь удерживать его во взвешенном состоянии. Для данной системы это соответствует вполне определенному значению Δp . Тогда секундный расход топлива через ротаметр

$$G_r = \mu (F - f) \sqrt{2\Delta p \rho_r},$$

где μ — коэффициент расхода; F — площадь сечения конусной трубки в зоне расположения поплавка; f — площадь сечения поплавка; ρ_r — плотность топлива.

Поскольку для каждого прибора Δp — величина постоянная, то ротаметры часто называют расходомерами постоянного перепада. Если строго выдерживать сорт топлива и температуру его, то перемещение поплавка будет мерой расхода топлива. Учитывая, что величины μ и F переменны и зависят от расхода, шкалу ротаметров определяют путем тарирования с соблюдением определенных условий и заданного топлива. Флоуметры и ротаметры требуют периодической проверки не только вследствие изменения применяемого топлива, но и по причине возможных отложений различных веществ на поверхностях калиброванных отверстий и поплавка. Точность показаний таких приборов в лучшем случае составляет около $\pm 3\%$.

Электрические средства измерения расхода топлива допускают установку датчиков как по обычной схеме между топливным баком и двигателем, так и непосредственно в топливоподогревающие системы двигателя. Чаще всего применяют второй способ, особенно при исследовании неустановившихся режимов работы [2].

Для указанных целей измерения расхода нестационарных потоков пригодны как термоанемометры, так и калориметрические расходомеры. В практике измерения расхода топлива обычно применяют термоанемометры, чувствительные элементы которых могут быть выпол-

нены с габаритами, позволяющими легко встраивать их непосредственно в канал или распылитель карбюратора [2].

Принцип действия термоанемометров и особенности устройства рассмотрены ранее. Недостатки их в применении к определению расхода топлива состоят в необходимости периодической тарировки и возможного закипания топлива в зоне чувствительного элемента,

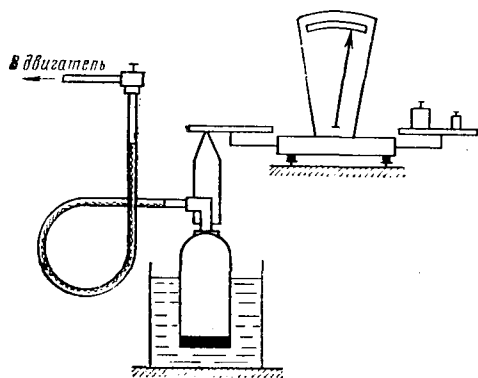


Рис. VIII.15. Схема устройства для определения весового расхода газа

особенно при малых скоростях движения топлива. Это нарушает работу измерительного прибора и осложняет пользование им. Поэтому термоанемометры применяют только в случаях, когда другими средствами нельзя с достаточной точностью зафиксировать расход топлива, главным образом, на неустановившихся режимах работы двигателя.

Измерение расхода газообразного сжижаемого и сжижаемого топлива в принципе может быть выполнено опи-

санными выше средствами измерения расхода воздуха. Но сравнительно малые часовые расходы топлива позволяют использовать для этих целей лишь газовые счетчики, например типа ГКФ-6, или же по ГОСТ 14846—69 применять метод взвешивания.

Рекомендации ГОСТа распространяются как на сжижаемые, так и на сжимаемые газы. Для определения расхода газа следует взвесить баллон с газом до и после замера и подсчитать результат (кг/ч) по формуле

$$G_r = 3,6 (\Delta G_r / \tau),$$

где τ — продолжительность замера, с; ΔG_r — разность масс баллона с газом до и после замера.

Метод взвешивания довольно громоздок, особенно в случаях необходимости объективно оценить влияние присоединительных шлангов и арматуры на результаты опыта. Одно из простейших взвешивающих устройств показано на рис. VIII.15 [13].

В более сложных устройствах присоединительный шланг от баллона (емкостью примерно 30 л), шарнирно (на призме) подвешенный к чашке весов и погруженный в водяную ванну так, что находится в равновесном состоянии, проходит под чашкой весов, образуя петлю. Это позволяет учитывать не только погрешности, вызываемые наличием самого шланга, но также и влияние давления в нем, если условия опыта и тарировки системы строго сопоставимы [13].

На рис. VIII. 16 приведена схема измерительного устройства с газовым счетчиком ГК-6, применявшаяся в НАМИ при испытании двигателя на сжиженном газе [65]. Газ из баллона 7 (баллоны вынесены

за пределы помещения бокса) через магистральный вентиль 6 поступает в испаритель 5, подогреваемый водой из системы охлаждения двигателя, а потом в промежуточный вспомогательный редуктор 4. Размещение счетчика 3 расхода, приспособленного под повышенные избыточные давления, между редукторами 4 и 2 (последний входит в комплект приборов системы питания двигателя) позволяло поддер-

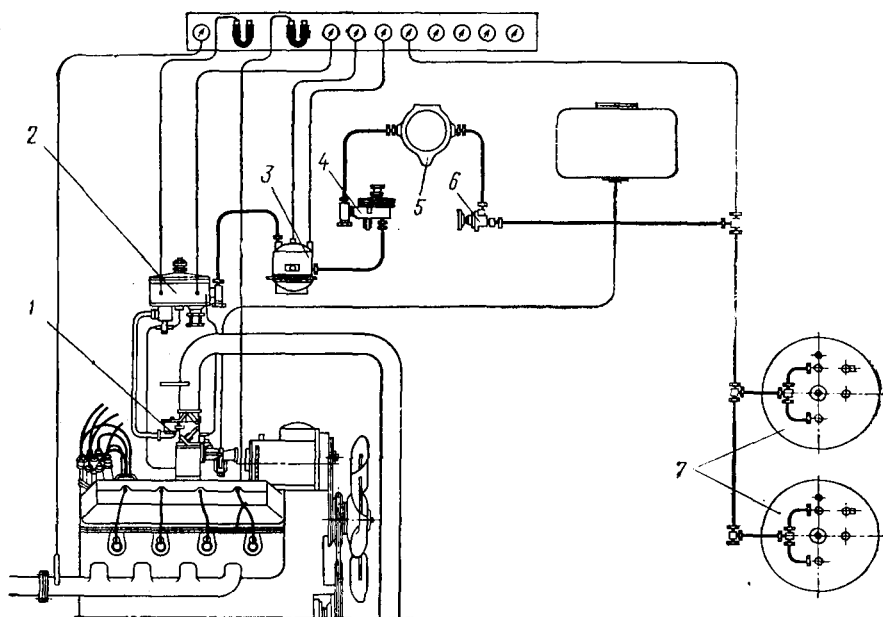


Рис. VIII.16. Схема питания и измерения объемного расхода газа при испытании двигателя

живать в системе требуемое постоянное давление и исключало влияние приборов 3 и 4 на величину давления газа на входе в смеситель 1.

При измерении расхода газа обязательно фиксируют его давление и температуру, а часовой расход газа (кг/ч) определяют по известной формуле с учетом приведения объемного расхода газа к стандартным условиям (20° С и 760 мм. рт. ст.):

$$G_p = 0,3855 V_r \rho_r (735 p_m + B_t) / (273 + t_r),$$

где V_r — измеренный объем газа, м³/ч; p_m — показание манометра, кгс/см²; B_t — барометрическое давление, мм рт. ст.; t_r — температура газа в счетчике, °С; ρ_r — плотность газа при стандартных условиях, кг/м³.

Применение газовых счетчиков обеспечивает измерение расхода газа с точностью примерно 2%. Весовой способ может обеспечить несколько большую точность.

**§ IX.1. Назначение и методы
анализа газов**

В применении к двигателям внутреннего сгорания анализ газов используют при исследовании состава отработавших и картерных газов, с целью оценки полноты сгорания топлива, токсичности двигателей и определения величины коэффициента избытка воздуха α по продуктам сгорания. При работе на газовом топливе анализом газов определяют и химический состав топлива.

Газовый анализ позволяет определять фактическое использование воздуха и топлива в двигателе с учетом распределения по отдельным цилиндрам, возможных потерь вследствие перетекания через выпускное отверстие цилиндра и в полость картера и т. д. В двухтактных двигателях анализ газов является единственной возможностью определения коэффициентов наполнения и продувки цилиндров. К анализу газов прибегают также при исследовании состава рабочего тела в цилиндрах двигателя на отдельных стадиях протекания его рабочего цикла и в других случаях.

В настоящее время объем полного анализа газов тепловых двигателей определяют потребностями исследования их токсичности, поэтому качественно и количественно современные методы анализа отличаются от прежних, охватывавших количественное определение лишь таких компонентов рабочего тела, как: N_2 , CO_2 , CO , O_2 , H_2 и CH_4 . В этот перечень входят теперь десятки наименований сложных и простых веществ, включая различные углеводороды (часть из которых канцерогенна), альдегиды, окислы азота и другие высокотоксичные компоненты.

Для исследования токсичности двигателей, особенно на переменных режимах работы, широкое применение находят автоматические газоанализаторы с непрерывным вводом анализируемого газа и записью результатов на ленту с помощью самописцев. Не утратил своего значения и анализ по разовым пробам. Поэтому современные лаборатории анализа газов оснащают разнообразной аналитической аппаратурой. Необходимость этого обуславливается и тем, что в подавляющем большинстве действие средств анализа газов основано на измерении концентрации данного вещества по присущим только ему отличительным физико-химическим свойствам в многокомпонентной газовой смеси, которые могут служить измеряемой величиной при использовании определенных способов анализа и соответствующих газоанализаторов.

По принципу действия существующие газоанализаторы разделяют на: механические, тепловые, магнитные, электрические, оптические, хроматографические и масс-спектрометрические [5, 44].

Механические газоанализаторы основаны на измерении молекулярно-механических параметров состояния или свойств анализируемой газовой смеси. Измеряемыми величинами в приборах этого типа служат: изменение объема или давления пробы газовой смеси после химического воздействия на данный компонент; вязкость газовой смеси, плотность ее и некоторые свойства, от нее зависящие (например, скорость распространения звука и ультразвука, скорость диффузии). Соответственно этому различают: объемные, манометрические, плотномерные, акустические и ультразвуковые, диффузионные и другие механические газоанализаторы.

Наиболее распространены из них объемно-манометрические и акустические газоанализаторы. В практике лабораторий двигателей в свое время широко использовали простейшие объемные ручные приборы Орса [5, 44]. Затем появились более совершенные ручные приборы ВТИ конструкции Теплотехнического института [12, 55, 58]. Но все-таки объемные приборы далеко не отвечают современным требованиям. На проведение полного качественного и количественного анализа газов объемным методом приходится затрачивать много времени, работать с большим набором поглотительных растворов, причем в случаях слабой концентрации искомого компонента даже при очень тщательном выполнении всех операций не всегда можно рассчитывать на достаточную точность результатов. Для обнаружения совсем малых концентраций компонентов в газовой смеси объемный метод вообще непригоден.

Тепловые газоанализаторы базируются на определении тепловых свойств искомого компонента газовой смеси. Измеряемыми величинами в них служат теплопроводность газовой смеси и полезный тепловой эффект реакции каталитического окисления определяемого компонента. Поэтому такие газоанализаторы разделяют на теплопроводные и термохимические. Оба вида приборов выпускают автоматизированными с электронными показывающими или самопишущими устройствами.

Магнитные газоанализаторы основаны на измерении магнитных параметров газов, характеризующихся объемной и удельной магнитной восприимчивостью. Первая из них оценивает интенсивность намагничивания газа при данной напряженности магнитного поля и зависит от плотности, а следовательно, температуры и давления газа. Удельная магнитная восприимчивость не зависит от агрегатного состояния вещества, температуры и давления.

Известно, что наибольшей магнитной восприимчивостью обладает кислород. Это свойство его столь велико, что определяет магнитную восприимчивость всей газовой смеси независимо от содержания других компонентов, позволяя вести избирательные измерения концентрации кислорода в сложных газовых смесях.

Электрические газоанализаторы основаны на принципе измерения одной из электрических характеристик непосредственно самого газа

или жидкости, с которой прореагировал газ. К таким анализаторам относят различные ионизационные и электрохимические приборы.

Оптические газоанализаторы составляют многочисленную группу приборов, которые по изменению, например, показателя преломления, оптической плотности, спектрального поглощения или излучения и других оптических свойств анализируемой газовой смеси позволяют судить о концентрации в ней искомого компонента.

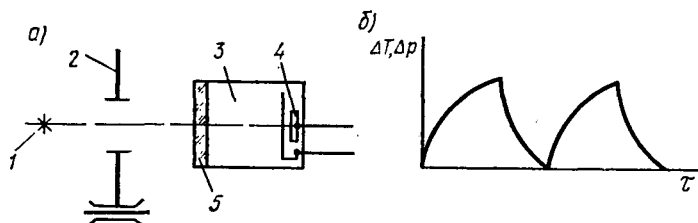


Рис. IX.1. Устройство и действие оптико-акустического газоанализатора:

а — принципиальная схема; *б* — диаграмма изменения давлений в лучеприемнике по времени τ

В практике анализа часто применяют свойства газов поглощать энергию электромагнитных излучений, в частности, γ -излучений, рентгеновских, ультрафиолетовых, видимых и инфракрасных лучей и радиочастотных излучений. Интенсивность поглощения газом лучистой энергии определяется при этом закономерностью

$$J_{\lambda} = J_{0\lambda} e^{-\epsilon_{\lambda} c L},$$

где $J_{0\lambda}$ и J_{λ} — интенсивность падающей и, соответственно, прошедшей монохроматической радиации (т. е. имеющей определенную длину волн); ϵ_{λ} — коэффициент поглощения, характерный для данного газа и являющийся функцией длины волн; c — концентрация газа, поглощающего излучение; L — длина (толщина) слоя исследуемого газа.

Из рассматриваемых приборов наиболее распространены оптико-акустические анализаторы, основанные на поглощении инфракрасного излучения. В этой области спектра каждый газ поглощает излучения в свойственных ему участках, обусловливаемых частотами собственных колебаний атомов или ионов и отдельных структурных групп в молекуле, а также вращением последних с различной угловой скоростью. Вследствие этого инфракрасную радиацию поглощают только газы, молекулы которых содержат не менее двух различных атомов или ионов. Кислород, азот, водород, гелий, аргон и другие аналогичные газы не поглощают инфракрасную радиацию. Тем не менее метод довольно универсален и отличается высокой избирательностью, что позволяет определять содержание отдельных компонентов в сложных газовых смесях независимо от концентрации других ее компонентов.

Механизм действия оптико-акустических анализаторов основан на использовании явления разогрева газа при поглощении радиации и охлаждении его, когда действие лучей прекращается. Поэтому

для целей анализа исследуемый газ помещают в закрытый сосуд-лучеприемник 3 и через окно 5 из синтетического корунда или другого материала, пропускающего инфракрасную радиацию, с помощью обтюратора 2 периодически облучают от источника 1 инфракрасной радиации, в качестве которого служат хромоникелевые нити (рис. IX.1, а). В результате одновременно с изменением температуры газа на величину ΔT в лучеприемнике соответственно изменяется и давление на величину Δp (рис. IX.1, б), которое воспринимается чувствительным элементом-микрофоном 4.

Чтобы повысить точность измерений, используют двухканальные (дифференциальные) оптические системы (рис. IX.2), в которых потоки радиации от двух одинаковых источников 2, фокусируемые отражателями 1, проходят через два идентичных оптических канала. Периодически и одновременно потоки прерываются обтюратором 4, вращаемым двигателем 3 с частотой примерно 5—6 Гц. В правом из каналов поток последовательно проходит через рабочую 5 и фильтрующую 6 камеры, а в левом — соответственно через сравнительную 13 и фильтрующую 12 камеры и поступает в левую часть 10 лучеприемника 11, отделенную от правой части 7 тонкой мембраной — элементом конденсаторного микрофона. Колебания мембраны и соответствующие этому изменения емкости конденсатора, преобразуемые на выходе из усилителя 9 в постоянный ток, характеризуют поглощение инфракрасной радиации в рабочей камере и, следовательно, служат мерой концентрации искомого компонента в исследуемой газовой смеси, которая фиксируется прибором 8.

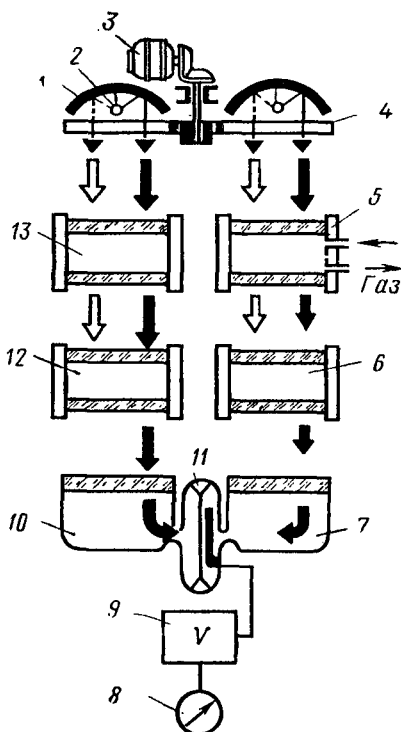


Рис. IX.2. Блок-схема двухканального инфракрасного газоанализатора

Наличие в оптических каналах фильтрующих камер позволяет исключить влияние мешающих компонентов, если их спектры поглощения частично перекрывают спектры поглощения определяемого компонента (рис. IX.3). Фильтрующие камеры в таких случаях заполняют газом или смесью газов в пропорции, обеспечивающей селективность анализатора в отношении определяемого компонента.

Фильтрующими устройствами снабжают все так называемые *бездисперсионные инфракрасные анализаторы*, работающие без разложения пучка света с помощью призм, решеток или интерференционных

фильтров, которые применяют в *дисперсионных анализаторах* с целью получения мономатического излучения. Бездисперсионные анализаторы проще, надежнее и дешевле дисперсионных, поэтому и получили преимущественное распространение.

Отечественная промышленность выпускает оптико-акустические инфракрасные газоанализаторы ОА-2109, ОА-2209 и ОА-2309 производства Смоленского завода средств автоматики [44]. Они позволяют

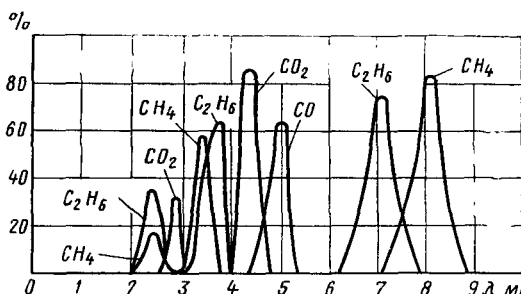


Рис. IX.3. Спектры поглощения (в %) некоторых газов в инфракрасной области

с точностью $\pm 2,5\%$ определять содержание в газовой смеси окиси углерода, углекислого газа, метана и суммы углеводородов при непрерывном отборе проб. Но не рассчитаны на определение содержания окислов азота и альдегидов в анализируемых газах.

Из других приборов рассматриваемого типа широкую известность получили бездисперсионные газоанализаторы «Бекман» (США) и «Хориба» (Япония), работающие с непрерывным отбором проб и записью результатов на ленту. На рис. IX.4, а показаны общий вид инфракрасного газоанализатора «Хориба» модели МЕХА-16, а на рис. IX.4, в его технологическая блок-схема. Это — крупногабаритная модель, имеющая массу около 700 кг. Ее газоотборная система состоит из охлаждающей установки ОУ с охлаждающим баком ОБ, фильтров (на схеме не показаны) и четырех насосов Н для подачи исследуемого газа. «Хориба» имеет пять анализаторов А с инфракрасным излучением, один анализатор с ультрафиолетовым излучением и отдельный настольный самописец. С помощью недисперсных инфракрасных лучей определяют CO ($0-12\%$), CO_2 ($0-16\%$), углеводороды низкой ($0-2000$ ppm*) и высокой ($0-10\,000$ ppm) концентраций, NO низкой ($0-500$ ppm) и высокой ($0-2000$ ppm) концентраций; недисперсные ультрафиолетовые лучи применяют для определения NO_2 в пределах концентраций $0-200$ ppm. Таким образом, одновременно определяют шесть компонентов газа с точностью $\pm 1\%$ при общем времени срабатывания менее 3 с с учетом транспортного запаздывания. Пробоотборник газоанализатора (см. рис. IX.4, б) приспособлен к отбору газа из выпускной трубы глушителя автомобиля.

В США в практику исследования токсичности автомобилей введены флуоресцентные и химлюминесцентные оптические анализаторы, обладающие повышенной чувствительностью и селективностью.

Флуоресцентный недисперсионный инфракрасный анализатор применяют для определения окиси углерода CO . Источник радиации в нем снабжен газовыми элементами с флуорес-

* ppm — число частиц на миллион частиц смеси (parts per million).

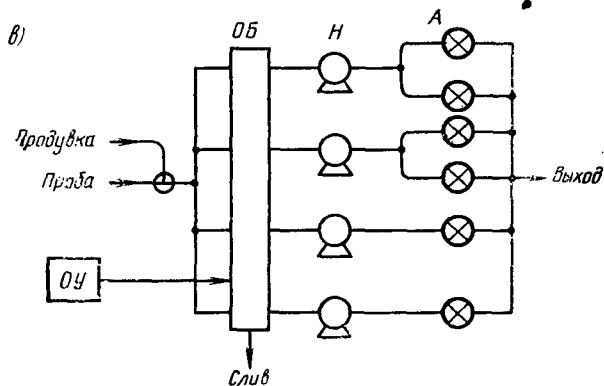
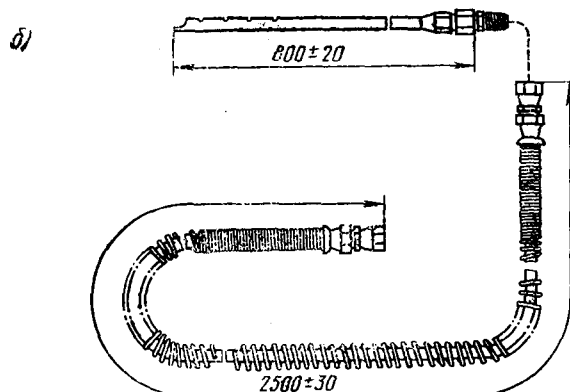
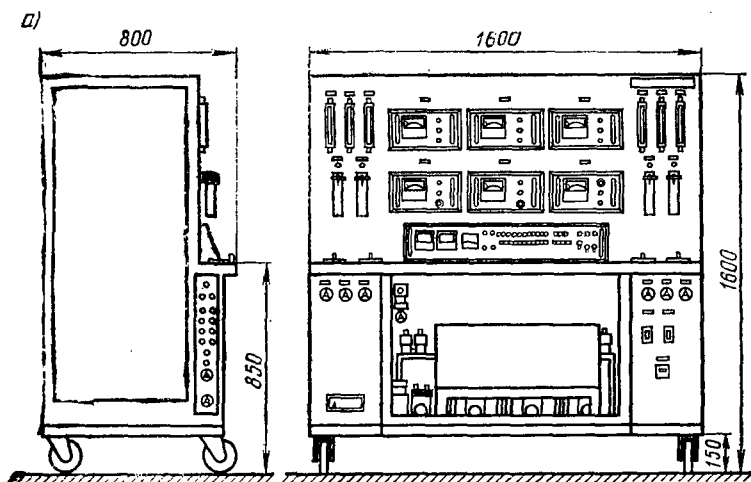


Рис. IX.4. Газогенератор «Хориба» модели МЕХА-16

цирующими изотопами $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ и $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$, возбуждаемыми светом. Через сравнительную камеру анализатора пропускают радиацию только изотопа $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$, а в рабочую камеру попеременно вводят оба изотопа, сохраняя между ними и их суммарным количеством пропорции 0,2% $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ и 99,8% $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$. Выход оценивают по соотношению

$$(^{12}\text{C}^{18}\text{O} - ^{12}\text{C}^{16}\text{O}) / (^{12}\text{C}^{18}\text{O}).$$

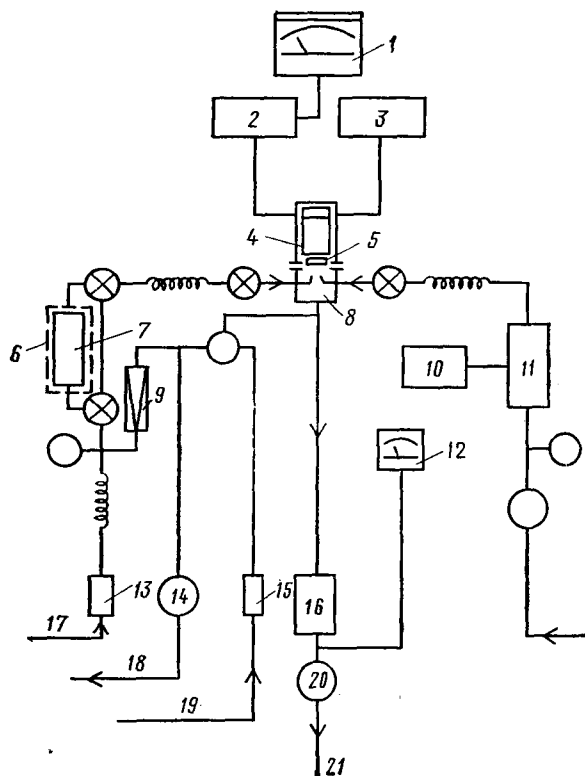
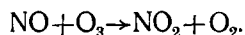


Рис. IX.5. Блок-схема химлюминесцентного газоанализатора:

1 — прибор регистрации количества NO_x ; 2 — усилитель; 3 и 10 — источники высокого напряжения; 4 — фотоэлектронный умножитель; 5 — светофильтр; 6 — высокотемпературный подогреватель; 7 — конвертор; 8 — камера-реактор; 9 — расходомер; 11 — генератор озона; 12 — вакуумметр; 13 — фильтр; 14, 15 и 20 — насосы; 16 — резервуар; 17 и 19 — входы пробы и воздуха; 18 и 21 — выходы в атмосферу

Химлюминесцентный анализатор основан на химической люминесценции окиси азота NO с озоном O_3 :

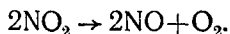


Так как интенсивность протекания этой реакции пропорциональна расходу окиси азота NO , то представляется возможным на сравнительно высоком уровне автоматизировать определение количественного

ее содержания при непрерывном вводе анализируемого газа в рабочую камеру-реактор 8 по схеме, показанной на рис. IX.5. Одновременно с пробой в эту же зону вводят озон, причем с помощью насоса 20 в реакторе поддерживают несколько пониженное давление, но допускают также избыточное 1÷5 мм рт. ст.

В процессе образования двуокиси азота около 10% ее выходит в возбужденном состоянии, из которого она легко переходит в нормальное, порождая излучение с длиной волны до 2500 нм в ближней инфракрасной области. Чтобы исключить из реакции мешающие компоненты, склонные к химлюминесценции с озоном (СО и др.), излучение пропускают через светофильтр 5, после чего в фотоэлектронный умножитель 4, являющийся лучеприемником системы, попадают лучи только с длиной волны менее 590 нм (1 нанометр = 10^{-9} м), что и обеспечивает высокую селективность анализатора.

При наличии в пробе двуокиси азота NO_2 она предварительно превращается в NO путем нагрева пробы (газа) до 600°C в специальном конверторе 7 в течение примерно 2 с:



Выход фототока имеет линейную зависимость от потока радиации в диапазоне от нуля до нескольких процентов. Скорость срабатывания анализатора (90%) составляет примерно 1 с при воспроизводимости около $\pm 1\%$.

На практике широко применяют также газоанализаторы, позволяющие обнаруживать концентрацию искомого компонента газовой смеси по интенсивности поглощения видимого света раствором, в который введен данный компонент смеси. Такие газоанализаторы называют *фотокolorиметрическими*.

В фотокolorиметрических газоанализаторах используют цветную избирательную реакцию химического взаимодействия между искомым компонентом газовой смеси и индикаторным раствором, от степени окрашивания которого и зависит интенсивность светопоглощения. По сравнению с другими метод фотокolorиметрирования обладает существенными преимуществами: высокой, практически неограниченной чувствительностью вследствие возможности накопления определяемого компонента в растворе за счет увеличения количества газа, проходящего через данный индикаторный раствор; высокой избирательностью, определяемой специфичностью индикаторного раствора и, наконец, универсальностью самого прибора, позволяющего работать с различными индикаторными растворами, подбираемыми под определенный газовый компонент.

Однако фотокolorиметрические газоанализаторы непригодны для измерения больших концентраций искоемых компонентов, поэтому их используют в основном для определения содержания только некоторых токсичных компонентов, в том числе в отработавших и картерных газах двигателей внутреннего сгорания.

Хроматографические газоанализаторы представляют собой устройства, позволяющие разделять сложные газовые смеси на отдельные

составляющие вследствие адсорбционных процессов, предопределяющих разную скорость отдельных компонентов смеси при движении ее вдоль слоя сорбента. Сорбентами обычно служат твердые тела и жидкости, наносимые на твердые тела. Поэтому газовую хроматографию разделяют на газо-адсорбционную и газожидкостную.

В газо-адсорбционной хроматографии применяют твердые адсорбенты, которыми служат материалы с развитой

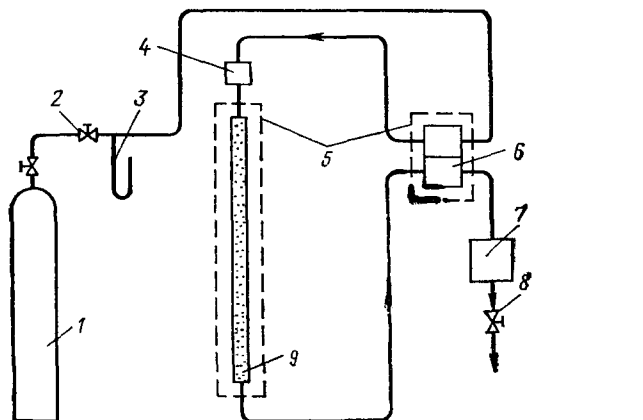


Рис. IX.6. Блок-схема хроматографического газоанализатора

пористостью, увеличивающей объем сорбционного пространства. В частности, активированные угли, природные и синтетические цеолиты, силикагели и алюмагели.

В газожидкостной хроматографии используют различную растворимость газовых компонентов в жидкостях, наносимых на поверхность тефлона, кирпича и других твердых инертных носителей. Жидкими сорбентами служат высокомолекулярные эфиры, спирты, парафиновые углеводороды и силиконовые масла.

Хроматографические газоанализаторы находят самое широкое применение в исследованиях состава газов автомобильных и тракторных двигателей при разовых отборах проб. Принципиальная схема простейшего анализатора этого типа показана на рис. IX.6. Газ-носитель из баллона 1 проходит через сравнительную камеру дифференциального детектора 6, дозатор 4 ввода пробы в анализатор и вместе с анализируемым газом поступает в разделительную хроматографическую колонку 9, после которой проходит через рабочую камеру детектора 6 и контрольное устройство 7. Анализируемая газовая смесь разделяется на отдельные компоненты, так как последние перемещаются вдоль колонки с разной присущей каждому из них скоростью. Поэтому в принятых условиях разделения (температура колонки и детектора, расход газа-носителя, марка адсорбента) время выхода отдельных компонентов строго постоянно, что и служит основой расшифровки хроматограмм. Чтобы повысить точность анализа, колонку

и детектор размещают в термостатах 5, а расход газа-носителя (например, воздуха, азота, гелия, аргона) тщательно регулируют вентилями 2 и 8 тонкой настройкой, контролируя давление газа в системе с помощью манометра 3.

К основным узлам всякого хроматографа относятся разделительная колонка, детектор и дозатор. На практике обычно применяют так называемые набивные разделительные колонки с внутренним диаметром трубки 4 мм и длиной 1 ÷ 3 м. В качестве детекторов используют при этом приборы, основанные на измерении: теплопроводности, плотности, теплоты сгорания и ионизации [5, 44]. Детекторы должны отвечать весьма строгим требованиям, т. е. обладать нужным быстродействием, высокой чувствительностью и обеспечивать преобразование измеряемой величины в электрическую с линейной зависимостью измеряемой силы тока от концентрации компонента. Из названных предпочтительнее ионизация, но поскольку детекторы не обладают универсальными свойствами, то хроматографы часто снабжают набором их.

Хроматограмма выглядит как основная линия фона чистого газа-носителя, прерываемая пиками (всплесками) ряда кривых. Площади, ограниченные этими всплесками, характеризуют количественное содержание отдельных компонентов анализируемой газовой смеси. Метод позволяет определять концентрации веществ, имеющих порядок миллионных долей с точностью $\pm 3\%$ и воспроизводимостью до 0,5%.

Масс-спектрометрические газоанализаторы отличаются тем, что в них используют основную характеристику вещества, массу молекулы или атома. Масс-спектрометры позволяют изучать быстротекущие процессы, кинетику химических реакций, а также строение молекул и в последнее время находят применение для анализа химического состава газовых смесей.

Сущность масс-спектрометрического анализа состоит: в превращении молекул данного вещества в ионы и формировании ионного пучка в электрическом поле источника ионов; разделении ионного пучка по массам в магнитном или электромагнитном поле или в пространстве без этих полей и, наконец, в улавливании ионов и регистрации ионных токов каждой составляющей ионного пучка в приемнике ионов.

В данном курсе не представляется возможным хотя бы кратко описать большое многообразие современных газоанализаторов. С особенностями конструкции и техникой применения их для конкретных целей можно ознакомиться в специальной литературе [5, 44]. Следует, однако, помнить, что точность газового анализа во многом предопределяется еще на стадии отбора проб и зависит поэтому от его тщательности и опыта персонала испытателей.

§ IX.2. Отбор проб газа

В зависимости от назначения и технических возможностей проведения анализа газов отбирают или относительно небольшие пробы, или собирают весь газ за установленный цикл испытаний.

Небольшие пробы газа могут быть разовыми и непрерывными, отбираемыми с целью ввода в быстродействующие анализаторы или сбора в специальные емкости. Разовые пробы отбирают из потока газа по выходе из двигателя, а также непосредственно из отдельных его полостей (цилиндры, камеры сгорания и т. д.).

Сбор газа в емкости обычно применяют при исследовании токсичности двигателей по методу многорежимного цикла испытаний, имитирующего типичные условия городской эксплуатации автомобилей.

Отбор проб по любому из названных способов затруднен тем, что отработавшие и другие газы тепловых двигателей представляют собой многокомпонентную и весьма агрессивную смесь, содержащую сравнительно много кислорода, окиси углерода, паров воды и иных компонентов, включая кислотообразующие окислы, в том числе растворимые в воде, как например, двуокись азота и альдегиды. Выбрасываемые двигателем потоки газа имеют к тому же пульсирующий характер движения, а в зонах, примыкающих к выходу из двигателя, и тем более во внутренних его полостях химический состав газа непрерывно изменяется.

Для выявления истинного состава газов важно, чтобы пробозаборные устройства, в частности, стенки пробоотборника, газоотводной трубки и емкости хранения пробы газа не реагировали с отдельными компонентами пробы и не оказывали катализирующего влияния на процессы окисления газов, а также исключали возможность утечек газа вследствие проницаемости некоторых компонентов смеси или плохой стыковки каналов.

Пробоотборники и зонды для взятия проб рекомендуется изготовлять из керамических и кварцевых трубок [55] или же использовать трубки из нержавеющей стали. Можно применять и обычные стальные трубки, если температура газа в зоне отбора ниже 500°C . Иначе возможна химическая реакция стальных стенок с двуокисью углерода [55]. Менее всего отвечают требованиям медные трубки, легко реагирующие с кислородом пробы газов.

Пробоотборники часто выполняют в виде простой открытой трубочки и вводят в канал перпендикулярно к потоку, что уменьшает вероятность их засорения при наличии в газах конденсата, сажи и других включений. Однако в случаях определения, например, дымности газов заборник соответствующих размеров ставят открытым концом против потока (см. гл. X). Если способ отбора газов из выпускного трубопровода не оговорен определенными условиями, то пробоотборник рекомендуется располагать в зоне, отстоящей на $0,7\div 0,8$ м от фланца присоединения его к выпускному коллектору двигателя и примерно на $0,9$ м от выхода газов в атмосферу [22]. В этой зоне температура газов не превышает 500°C и условия для быстротекущих химических реакций в них отсутствуют. Исключена также вероятность конденсации углеводородов и подсоса в нее воздуха из атмосферы вследствие периодического возникновения вакуума, порождаемого пульсирующим движением потока отработавших газов.

Из внутренних полостей двигателя отбор проб газа осуществляют

с помощью различных клапанных устройств как стробоскопического действия, так и одноразового отбора с гидравлическими, электромагнитными и реже с механическими приводами их [43, 58]. На рис. IX.7 в качестве примера показана конструкция электромагнитного газоотборника стробоскопического типа, а на рис. IX.8 — блок-схема

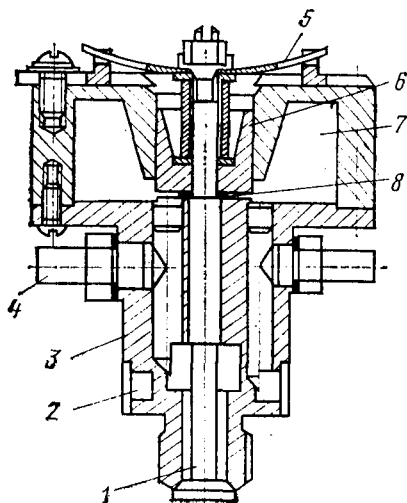


Рис. IX.7 Электромагнитный газоотборник стробоскопического типа

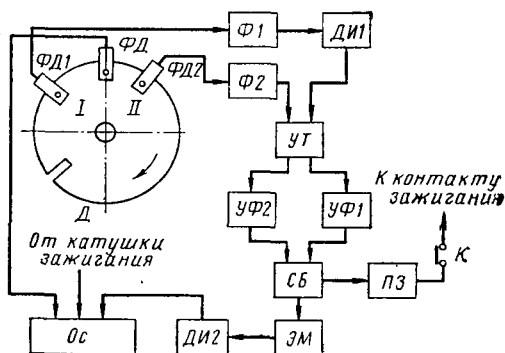


Рис. IX.8. Блок-схема управления стробоскопическим клапаном

электронного управления им [18], пригодная для обследования быстросходных двигателей автомобильного типа.

Тарельчатый клапан 1 газозаборника, с диаметром тарелки 13 мм, в закрытом состоянии удерживается плоской пружиной 5, а открывается по заданной программе электромагнитом, имеющим обмотку 7 и действующим на якорь 6, который закреплен на штоке клапана. Ход клапана, составляющий ≈ 1 мм, ограничивается величиной зазора между якорем и корпусом 3, для регулировки которого служит прокладка 8. Корпус газозаборника охлаждается проточной водой, циркулирующей через кольцевой канал 2, а газы из него отводят через штуцер 4. Клапан 1 может быть открыт на нужное мгновение при любом положении вала двигателя, на котором устанавливают диск Д управления прибором.

Перед отбором проб включают источники питания напряжением 500 и 12 В и устанавливают фотодатчики ФД1 и ФД2 в нужное положение относительно в. м. т., фиксируемой фотодатчиком ФД. Далее с помощью делителя ДИ2 числа импульсов устанавливают кратность срабатывания клапана (равную 8, 16, 32, 64 и 128 числам оборотов вала). При работе двигателя щель диска Д поочередно включает фотодатчики, импульсы от которых поступают в формирователи Ф1 и Ф2. Из первого импульсы поступают в делитель ДИ1, который в соответствии с установленной кратностью выдает импульс на управ-

ляющий триггер $УТ$ и переводит его в открытое состояние. Вследствие этого импульс поступает в усилитель-формирователь $УФ1$, затем на открывающий вход силового блока $СБ$, где вызывает разряд конденсатора. В результате по обмотке электромагнита $ЭМ$ проходит короткий мощный импульс тока (до 100 А), клапан 1 открывается и удерживается в таком состоянии тем же $ЭМ$, питаемым от источника низкого напряжения (12 В), до момента поступления импульса от $ФД2$, который через формирователь $Ф2$ вновь переводит триггер $УТ$ в закрытое состояние и управляющий импульс через усилитель-формирователь $УФ2$ поступает на запирающий вход $СБ$. В результате разряжается второй конденсатор и по обмотке $ЭМ$ проходит импульс тока противоположного направления, обеспечивающий закрытие клапана 1. Длительность срабатывания последнего фиксируется осциллографом $Ос$ через делитель $ДИ2$.

В схеме предусмотрена система пропуска зажигания $ПЗ$, срабатывающая при замкнутом ключе $К$, что позволяет увеличивать продолжительность отбора пробы в процессе сжатия (с выключенным зажиганием в обследуемом цилиндре). Минимальная продолжительность отбора пробы составляет 0,8—1,0 мс, что указывает на возможность отбора проб при $n=8000\text{—}9000$ об/мин.

В литературе [58] приведен автоматический пробоотборный клапан, позволяющий отбирать газы из зоны выпускного клапана в начальной стадии выпуска, что полезно для исследования некоторых процессов.

Газоотводные трубки составляют одно целое с заборниками газов или же плотно стыкуются с ними с помощью резьбовых и иных соединений. Недопустимо, чтобы в случае отбора разовых проб газы охлаждались в трубке ниже точки росы. Это приводит к образованию тумана, с капельками которого растворившиеся в них токсичные вещества выпадают на ее стенки. При необходимости следует поэтому подогревать газоотвод, например, путем продувки исследуемыми газами. Продувка полезна также для проветривания газоотводного канала, особенно перед отбором пробы. Иначе состав газов в пробе не будет характеризовать данный режим испытаний.

Поскольку максимальное парциальное давление водяных паров в отработавших газах составляет около 0,7 кгс/см², то температура трубки должна быть не ниже 39° С. Практически рекомендуется применять трубки диаметром 8÷10 мм и длиной 0,4÷0,5 м из обычной [22], но предпочтительнее из нержавеющей стали и прогревать их до 60÷80° С. При более высоком нагреве возможны ожоги и подгорание резинового соединительного шланга, который становится источником сторонних примесей. Желательно иметь возможно короткие резиновые шланги, но лучше применять резину только для стыковки трубок, исключая непосредственный контакт ее с горячими газами.

При непрерывном отборе проб для анализа газов в быстродействующих газоанализаторах применяют специально 2,5—5-метровые виниловые трубки с внутренним диаметром 5÷6 мм или аналогичные тефлоновые обмотанные проволокой из нержавеющей стали

(рис. IX.4, б). На входе в анализатор отработавшие газы тщательно при этом фильтруют и обезвреживают путем охлаждения.

Емкости для сбора и хранения газов изготавливают как из жестких, так и из эластичных материалов.

При отборе разовых проб обычно применяют вакуумированные стеклянные колбы-аспираторы объемом $400 \div 500 \text{ см}^3$, имеющие форму удлиненных цилиндрических сосудов с одним или двумя вводами по торцам. Заполнение аспираторов требует большой осторожности, так как проникновение в них воздуха приводит к порче пробы. На состав газа в аспираторе оказывает влияние и слишком кратковременный отбор проб вследствие неидентичности работы отдельных цилиндров двигателя. Поэтому длительность отбора разовых проб должна быть соизмерима с $100 \div 200$ рабочими циклами испытуемого двигателя, что достигается путем установки жиклера-сопротивления между газоотводной трубкой и аспиратором [22].

Для сбора газов за цикл испытаний используют эластичные емкости-мешки, изготавливаемые из синтетических пленочных материалов, имеющих низкую газопроницаемость, например из тефлона, тедлера и значительно хуже из полиэтилена. Этот способ позволяет надежно усреднять состав анализируемого газа, но полностью не гарантирует сохранение его истинного состава. В случаях высокой концентрации отдельных токсичных компонентов возможна все-таки утечка их в атмосферу через стенки емкости или поглощение капельками влаги, выпадающими на стенки и даже химическая реакция между ними. Поэтому пробы для разового или непрерывного анализа газов следует отбирать из емкости сразу же по окончании испытаний. Чтобы резко уменьшить отрицательное влияние названных факторов, прибегают иногда к трех-, четырехкратному или еще большему разбавлению газов воздухом и применяют газоанализаторы повышенной чувствительности.

Сбор газов в эластичные емкости требует сравнительно сложные газоотборные устройства, которые являются составной частью установок по исследованию токсичности двигателей, в связи с чем особенности этих и аналогичных газоотборных устройств рассмотрены в гл. X одновременно с определением токсичности и дымности двигателей.

§ IX.3. Способы выражения концентрации компонентов газовой смеси

Концентрацию отдельных компонентов в газовой смеси выражают в единицах массы, содержащейся в единице объема, или в процентах по объему, т. е. в объемных процентах (% об.), что более удобно. Действительно, объемная доля отдельных компонентов в общем объеме при изменении внешних условий остается неизменной, тогда как число частиц в единице объема изменяется вместе с изменением давления и температуры смеси.

Концентрацию по массе измеряют в г/л, мг/л, г/м³ и мг/м³, а также числом граммов вещества в 100 г смеси (% массовые).

Очень малые количества измеряют в гаммах γ ; $1\gamma=10^{-3}$ мг и, следовательно, $1\text{ мг/м}^3=1\text{ }\gamma/\text{л}$.

Концентрацию канцерогенных веществ выражают в $\gamma/\text{м}^3$ или $\gamma/100\text{ м}^3$.

Концентрацию в объемных единицах измеряют числом миллилитров вещества в 100 мл смеси, т. е. в процентах по объему, или же в мл/л ($10^{-1}\%$) и мл/м³ ($10^{-4}\%$).

Малые концентрации выражают иногда числом частиц, приходящихся на миллион частиц всей смеси (чнм) или ppm

$$1\text{ ppm}=1/10^6=10^{-4}\% \text{ об.}$$

Очень малые концентрации выражают также числом частиц на миллиард частиц смеси и обозначают ppb (parts per billion):

$$1\text{ ppb}=1/10^9=10^{-7}\% \text{ об.}$$

Оценка токсичности газов в единицах ppm (чнм) удобна тем, что она всегда может быть выражена целыми числами. Например, 300, 800 чнм (частиц на миллион) и т. д.

При необходимости пересчета концентрации из массовых единиц, $g_{т.к}$ (мг/л) в объемные $c_{т.к}$ (% об.) и обратно можно пользоваться зависимостями:

$$c_{т.к}=[V_{м}g_{т.к}/(\mu_{т.к}\cdot 1000)]100,$$

$$g_{т.к}=10c_{т.к}\mu_{т.к}/V_{м},$$

где $V_{м}$ — объем одной грамм-молекулы, л (при 760 мм рт. ст. и 0°С $V_{м}=22,41$ л; при 20°С $V_{м}=24,12$ л); $\mu_{т.к}$ — молекулярная масса токсичного компонента, г (см. табл. X.2).

§ IX.4. Применение анализа газов для оценки использования воздуха и топлива в двигателях

Действительное использование воздуха и топлива в цилиндрах различных двигателей внутреннего сгорания обычно оценивают экспериментально, предпочитая метод анализа газов. По данным анализа определяют фактическую величину коэффициента избытка воздуха α , что позволяет судить, например, о распределении воздуха и топлива по цилиндрам в многоцилиндровых двигателях, оценивать степень использования их в связи с неизбежными потерями на продувку цилиндров двухтактных двигателей и т. д.

Жидкое топливо в таких расчетах принимают состоящим из углерода, водорода и кислорода, причем

$$C_r+H_r+O_r=1,$$

полагая, что азот, сера и другие элементы содержатся в нем в пренебрежимо малых количествах. Поэтому наличие азота в продуктах сгорания принимают пропорциональным количеству воздуха, вводимому в цилиндры двигателя. Следовательно,

$$\alpha=L/L_0=[N_2]/[N_2]_0,$$

где L и L_0 — фактическое количество воздуха в смеси, содержащей 1 кг топлива, и теоретически необходимое для полного сгорания 1 кг топлива, кмоль; $[N_2]$ и $[N_2]_0$ — соответствующие пропорциональные им объемные доли азота.

Поскольку чистый воздух содержит 79÷79,2% азота и 20,8÷21% кислорода, то в расчетах принимают средний по объему состав его, или названные составы, но чаще всего 79% N_2 и 21% O_2 .

Количество азота (кмоль), содержащееся в L кмоль воздуха, при всех значениях $\alpha < 1$ и $\alpha \geq 1$,

$$[N_2] = 0,79\alpha L_0,$$

где

$$L_0 = \frac{1}{0,21} \left(\frac{C_T}{12} + \frac{H_T}{4} - \frac{O_T}{32} \right) = \frac{C_T}{0,21 \cdot 12} \left(1 + 3 \frac{H_T - O_T/8}{C_T} \right)$$

или с учетом характеристики топлива β_T , зависящей от его состава и состава воздуха при сжигании топлива в атмосфере воздуха,

$$L_0 = [C_T / (0,21 \cdot 12)] (1 + \beta_T / 0,79) = (C_T / 1,99) (0,79 + \beta_T),$$

где

$$\beta_T = (3N_2 / C_T) (H_T - O_T/8) = (2,37 / C_T) (H_T - O_T/8).$$

Количество азота, содержащееся в L_0 кмоль воздуха,

$$[N_2]_0 = [N_2] - (79/21) [O_2],$$

где $[O_2]$ — количество кислорода в газах, найденное путем анализа.

Тогда, для случая полного сгорания топлива, получим простую и сравнительно точную расчетную формулу, называемую иногда *азотной*,

$$\alpha = N_2 / [N_2 - (79/21) O_2] = 1 / [1 - 3,76 (O_2 / N_2)],$$

где N_2 и O_2 — объемные проценты азота и кислорода в сухих продуктах сгорания, пропорциональные объемным долям $[N_2]$ и $[O_2]$.

В литературе [12, 55] изложены детальные выводы различных формул расчета α по результатам анализа газов при полном и неполном сгорании топлива. Поэтому далее приводим только некоторые из них в окончательном виде.

Заслуживает внимания, например, формула азотного варианта для случая неполного сгорания топлива с образованием CO , H_2 и CH_4 :

$$\alpha = \frac{1}{1 - 3,76 [O_2 - 0,5 (CO + H_2 + 4CH_4) / N_2]}.$$

Представляет интерес формула, позволяющая определять α как в случае полного сгорания, так и неполного в форме окиси углерода CO и сажи C или только в форме CO или только в форме C :

$$\alpha = 0,21\beta_T N_2 / (0,79 + \beta_T) (N_2 - 79 + 0,396 CO).$$

В данную и предыдущую формулу величины H_2 , O_2 , CO , N_2 и CH_4 следует подставлять в объемных процентах.

Применительно к распространенным в настоящее время методам анализа газов более приемлемы формулы расчета α , не содержащие

азот. В случаях полного сгорания топлива можно применять формулу

$$\alpha = 0,21 (0,79 + \beta_r \text{CO}_2) / [(0,79 + \beta_r) \text{CO}_2];$$

при неполном сгорании топлива удобна формула

$$\alpha = 1 + (\text{O}_2 + 0,5\text{CO}) / [(\text{CO}_2 + \text{CO}) (1 + \beta_r / 0,79)],$$

где O_2 , CO и CO_2 в объемных процентах.

Формулы, основанные на балансе углерода до и после сгорания, предложенные в последнее время [3, 7], позволяют учитывать как наличие в газах CO , H_2 и C_nH_m , так одновременно и зависимость кажущейся молекулярной массы сухих отработавших газов μ_r от состава смеси. Для практических расчетов в качестве исходного можно принимать равенство, не учитывающее свободный водород и влажность отработавших газов

$$\alpha l_0 + 1 = \frac{(\text{C}_r / 12) \mu_r}{[\text{CO}] + [\text{CO}_2] + \text{C}_{\text{C}_n\text{H}_m} (V_m / 12)} + 9 (1 - \text{C}_r),$$

где l_0 — теоретически необходимое количество воздуха, кг/кг топл.; C_r — содержание углерода в топливе в массовых долях; $[\text{CO}]$ и $[\text{CO}_2]$ — объемные доли окиси и двуокиси углерода в сухих отработавших газах; $\text{C}_{\text{C}_n\text{H}_m}$ — массовое содержание углерода в углеводородах на единицу объема сухих отработавших газов, мг/л; $V_m = 22,4$ л.

В расчетах принимают иногда среднее значение $\mu_r \approx 29,25$ [7], но это снижает их точность по сравнению с той, когда учитывают $\mu_r = f(\alpha)$, особенно в случаях $\alpha < 1$. Действительно, при $\alpha = 1 \div 1,3$ уменьшение величины μ_r не превышает 1,5% и составляет примерно 30,4, тогда как обогащение смеси до $\alpha = 0,65$ вызывает уменьшение μ_r до 27. По данным [3] можно рекомендовать

$$\mu_r \approx 30,4 - [\text{CO}] (11,7 + 23,9k),$$

где k — коэффициент пропорциональности, оценивающий известное экспериментально установленное соотношение между содержанием в газах свободного водорода и окиси углерода: $k = [\text{H}_2] : [\text{CO}] = \text{const}$. Для бензинов $k = 0,4 \div 0,5$, для природного газа $k = 0,6 \div 0,7$ [43].

Имея в виду изложенное и принимая $\text{C}_r = 0,85 \div 0,855$; $l_0 = 14,9 \div 15,0$; $k = 0,45$, получим расчетную формулу

$$\alpha = \frac{0,145 (1 - [\text{CO}])}{[\text{CO}] + [\text{CO}_2] + 0,00187 \text{C}_{\text{C}_n\text{H}_m}} + 0,023,$$

применение которой особенно целесообразно в случаях, связанных с определением состава смеси, поступающей в отдельные цилиндры двигателя, когда μ_r может изменяться в широких пределах.

Если коэффициент избытка воздуха горячей смеси i -го цилиндра обозначить через α_i , а средний для двигателя коэффициент избытка воздуха определить по известной формуле

$$\alpha = G_b / (G_r l_0),$$

то степень неравномерности распределения горючей смеси по отдельным цилиндрам двигателя относительно среднего для него коэффициента α , подсчитанного по фактическим расходам воздуха G_v и топлива G_t , можно определить из соотношения

$$\delta_i = (\alpha_i - \alpha) 100 / \alpha.$$

В двухтактных двигателях коэффициент избытка воздуха определяют по пробам газа, отбираемым из цилиндра в конце процесса расширения (до начала продувки). Располагая α , нетрудно определить коэффициенты наполнения η_v и продувки ϕ для этих двигателей по формулам [43]

$$\eta_v = \alpha l_0 G_t / (0,06 \rho V_d n); \quad \phi = G_v / (\alpha l_0 G_t),$$

где G_v и G_t — замеренные расходы воздуха и топлива, кг/ч; ρ — плотность свежего заряда (в двигателях с наддувом при p_k и T_k , без наддува — для условий окружающей среды); V_d — литраж двигателя, л; n — число оборотов вала в минуту.

ГЛАВА X

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКСИЧНОСТИ И ДЫМНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ

§ XI. Общие сведения

Большую половину токсичных веществ из выбрасываемых еще в воздушный бассейн городов и населенных пунктов составляют компоненты отработавших газов моторизованных транспортных средств, строительных, дорожных и общехозяйственных машин, оснащенных двигателями внутреннего сгорания. Основными токсичными компонентами отработавших газов этих двигателей являются окись углерода и окислы азота. В зависимости от применяемого топлива в газах обнаруживают окислы серы, свинца и других вредных соединений. С отработавшими и картерными газами двигателей различных типов в атмосферу выносятся также предельные и непредельные углеводороды и продукты промежуточного окисления их из группы альдегидов, канцерогенные вещества, сажа и другие компоненты, предопределяющие токсичность, запах и окраску газов. Примерный состав отработавших газов карбюраторных двигателей и дизелей без учета применения каких-либо противотоксичных средств, конструктивных решений и специальных устройств указан в табл. X.1 [8].

Таблица X.1

Компоненты отработавших газов	Предельное содержание, по объему (для газов), %		Примечание
	бензиновые двигатели	дизели	
Азот	74—77	76—78	Нетоксичен
Кислород	0,3—8,0	2—18	То же
Пары воды	3,0—5,5	0,5—4,0	»
Двуокись углерода	5,0—12,0	1,0—10,0	Нетоксична
Окись углерода	5,0—10,0	0,01—0,5	Токсична
Окислы азота	0—0,8	0,0002—0,5	Токсичны
Углеводороды неканцерогенные	0,2—3,0	0,009—0,5	То же
Альдегиды	0—0,2	0,001—0,009	»
Сажа *	0—0,04	0,01—1,1	Токсична
Бенз-а-пирен **	До 10—20	До 10	Канцерогенен

* Содержание в г/м³

** Содержание в мкг/м³

По действию на организм человека токсичные вещества не равноценны. Одни из них обладают большей ядовитостью, другие — меньшей. Этим и определяется допускаемое нормами СССР содержание вредных веществ в воздухе населенных пунктов (табл. X.2).

Таблица X.2

Компоненты отработавших газов	Химическая формула	Молекулярная масса μ	Плотность при тем- пературе $t=0^\circ\text{C}$ $\rho, \text{г/л}$	Допустимое средне- суточное содержание в атмосфере при $t=20^\circ\text{C}$ $g, \text{мг/м}^3$	Примечание
Оксид углерода	CO	28	1,250	1,0	В пересчете на токсичность NO_2 Группу альдегидов обычно пересчитывают на акролеин
Оксиды азота	NO_x	46	2,05	0,085	
Акролеин	CH_2CHCHO	56	—	0,03	
Формальдегид	HCHO	30	—	0,012	В пересчете на гексан C_6H_{14} В пересчете на бенза- а-пирен * $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$
Сернистый газ	SO_2	64	2,927	0,15	
Углеводороды неканцерогенные	C_nH_m	86	3,844	1,5	
Углеводороды канцерогенные	»	252	—	$0,18 \cdot 10^{-6}$	
Сажа	C	—	—	0,05	

* Указана предположительная норма, равная $\approx 0,018 \text{ мкг/100 м}^3$.

Токсичность отработавших газов во многом зависит от параметров двигателя, режимов работы, состава и распределения смеси по цилиндрам, ее качества и момента воспламенения, максимальной температуры цикла и других факторов. Так, по опытам автора, при работе двигателя ЗИЛ-130 на смесях с $\alpha=0,70$ концентрация CO достигает $7 \div 8\%$; при $\alpha=1,0$ снижается иногда до $0,3 \div 0,5\%$ и составляет $0,05 \div 0,2\%$ даже при обеднении смеси до $\alpha=1,15$. Наличие CO в газах при $\alpha \geq 1,0$ объясняется трудностями получения гомогенной (однородной) горючей смеси, неравномерным распределением воздуха и топлива по цилиндрам и другими причинами, влияющими на процессы смесеобразования и сгорания. Максимальное содержание в газах окислов азота, приведенных к N_2O_5^* , на больших и полных нагрузках достигает $7 \div 10 \text{ мг/л}$ при $\alpha \approx 1,0 \div 1,1$. С обогащением и обеднением смеси количество окислов азота в газах резко убывает, и приборы обнаруживают только их следы (рис. X.1). На малых нагрузках (развернутого двигателя) содержание окислов азота не превышает $3 \div 4 \text{ мг/л}$, но характерная пика наблюдается уже на горючих смесях с $\alpha < 1,0$.

* Формула пересчета $g_{\text{N}_2\text{O}_5} = 1,17 g_{\text{NO}_2} + 1,8 g_{\text{NO}}$

Известно, что выброс окислов азота NO_x предопределяется максимальной температурой цикла, вследствие чего количество NO_x в газах возрастает на всех режимах работы, если повышают, положим, степень сжатия, увеличивают опережение зажигания или предварение подачи топлива, т. е. вводят мероприятия, способствующие повышению максимальной температуры цикла. Например, повышение степени сжатия от $\epsilon=7$ до $\epsilon=8$ увеличивает количество NO_x в отработавших газах почти в два раза [35].

Рассмотренные и другие особенности в закономерности выброса двигателем токсичных веществ затрудняют борьбу с загрязнением

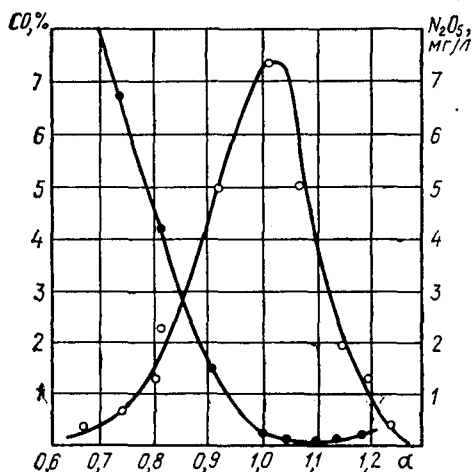


Рис. X. 1. Содержание токсичных компонентов в отработавших газах двигателя ЗИЛ-130 при различных составах горючей смеси на больших нагрузках

атмосферы и вынуждают конструкторов на крайние меры, нередко ухудшающие достигнутые уже технико-экономические показатели. В интересах создания более «чистых двигателей» практикуют дефорсирование их по ϵ и оборотам вала, настойчиво совершенствуют и разрабатывают новые рабочие процессы, переходят на газовые топлива и топлива с противодымными и иными присадками, стремятся повысить стабильность характеристик приборов питания и зажигания в эксплуатации. С той же целью двигатели оснащают специальными системами обесвреживания газов: дожигают газы в зоне выпускных клапанов,

нагнетая в нее свежий воздух с помощью соответствующего насоса; применяют каталитические нейтрализаторы на CO и NO_x ; вводят рециркуляцию отработавших газов, 10–20% которых возвращают в цилиндры с целью снижения максимальной температуры цикла, и т. д.

Однако противотоксичные устройства заметно удорожают двигатели, поэтому их применяют пока ограниченно, вследствие чего общий уровень загрязнения атмосферы в зонах главных транспортных артерий большинства крупных городов значительно превышает гигиенические нормы. В связи с этим разработку малотоксичных двигателей энергично стимулируют законодательными мерами. Во многих странах введены уже строгие ограничения на выброс токсичных продуктов двигателями и предусмотрены последующие ужесточения этих норм. Так, в США в 1972 г. допускали к эксплуатации только двигатели с закрытой системой вентиляции картера, выбрасывавшие в атмосферу на каждую милю пути автомобиля не более 39 г CO и 3,4 г C_nH_m , а к 1977 г. федеральными нормами предусмотрено снижение

выброса CO до 2,12 г, C_nH_m — до 0,256 г и NO_x — до 0,25 г (против 3,1 г NO_x по нормам 1973 г.).

В настоящее время токсичность двигателей оценивают с учетом соответствующей весовой категории автомобиля по официальной методике, выражая ее в основном в г на испытание или на единицу пути. Реже оценивают в % объемных и в % от массы расходуемого топлива. В странах Европы повсюду применяют методику, рекомендованную Европейской экономической комиссией (ЕЭК) ООН, основанную на так называемом ездовом цикле, имитирующем типичные условия на трассах городов с интенсивным уличным движением, для которых характерны режимы холостого хода, разгонов и замедлений с присутствиями им выбросами токсичных веществ. Установлено, что наиболее интенсивно двигатели загрязняют атмосферу на режимах разгона автомобиля (табл. X.3).

Таблица X.3

Режимы	Содержание токсичных веществ в отработавших газах на единицу пути, %		
	C_nH_m	CO	NO_x
Холостой ход	5,9	7,5	0,03
Разгон	56,3	62,2	78,4
Движение с постоянной скоростью	14,1	14,3	21,4
Замедление	23,7	16,0	0,17

Методики «ездовой цикл», учитывающие особенности движения и плотность транспортных потоков, приняты также в Америке, Японии, Австралии и других странах.

§ X. 2. Испытания двигателей на токсичность

Правила ЕЭК ООН предусматривают три типа официальных (приемочных или контрольных) испытаний двигателей новых и модернизированных автомобилей, имеющих массу 400 ÷ 3500 кг.

Испытание I проводят по многорежимному ездовому циклу при температуре плюс 20 ÷ 30° С, начиная от пуска холодного двигателя и работы его на холостом ходу в течение 40 с. Цикл длительностью 195 с учитывает разгоны автомобиля, езду с различными постоянными скоростями движения, замедления и переключения передач по строгому регламенту (рис. X.2). Каждое испытание складывается из четырех повторяющихся 15-режимных циклов и продолжается 13 мин [34].

К испытаниям допускают технически исправные автомобили с пробегом 3000 км, двигатель, узлы и механизмы которых отрегулированы по инструкции завода-изготовителя. Автомобиль устанавливают на стенд с беговыми барабанами и инерционными массами, подобранными

для его весовой категории (табл. X.4), причем испытуемый объект термостатируют в течение 6 ч при температуре испытаний.

Газоотборное устройство испытательной установки снабжают эластичными емкостями для сбора всех отработавших газов, охладителем (теплообменником), насосом и расходомером (газовым счетчиком).

С помощью последних по окончании испытаний газы откачивают из

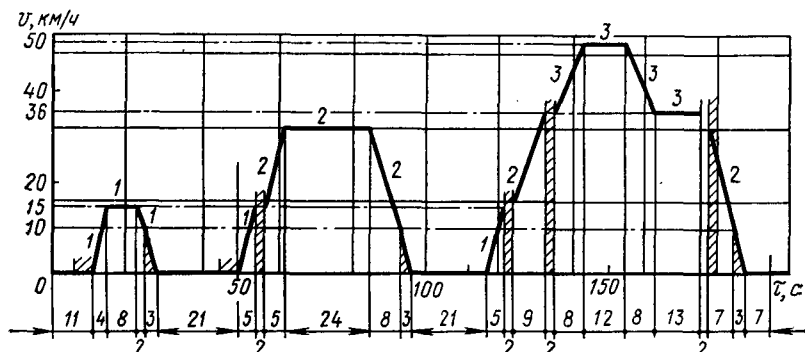


Рис. X. 2. Ездовой цикл ЕЭК ООН:

1÷3 — передачи, заштрихованные участки — переключение передач

емкостей и определяют их фактический объем. Точность измерений повышается, если противодействие газоотборного устройства не выходит за пределы 75 мм вод. ст., газы тщательно перемешивают за счет циркуляции в емкости, а температуру поддерживают близкой к температуре окружающей среды, уменьшая этим возможную конденсацию влаги на стенках емкости. Для испытаний рекомендован бензин с октановым числом ОЧ 99 ± 1 (по исследовательскому методу) содержащий до 1,25 г/кг ТЭС (тетраэтиловый свинец).

Таблица X.4 *

Контрольная масса автомобиля, кг **	Весовая категория автомобиля, кг	Допускаемое содержание токсичных веществ в отработавших газах на одно испытание, г/испытание			
		Количество СО автомобиля		Количество C_nH_m автомобиля	
		специально подготовленного	серийного	подготовленного	серийного
750÷850	800	109	131	8,4	10,9
1020÷1250	1130	134	161	9,4	12,2
1470÷1700	1590	169	203	10,8	14,0
1930÷2150	2040	203	244	12,1	15,7
Свыше 2150	2270	220	264	12,8	16,6

* Окислы азота NO_x в странах Европы еще не нормированы. Допускаемое содержание СО и СН в отработавших газах будет уменьшаться по мере совершенствования двигателей и методов борьбы с их токсичностью.

** Контрольная масса автомобиля принимается равной его массе в снаряженном состоянии с бачком, заправленным наполовину, плюс 120 кг, включающие водителя и дополнительный груз.

Сбор газов в емкости начинают одновременно с разгоном автомобиля, а химический состав оценивают по результатам анализа трех газовых проб, отбираемых из емкости не позже, чем через 20 мин после окончания испытаний. При непрерывной подаче газов в быстродействующие анализаторы о составе газов судят по установившимся показаниям приборов в течение 1 мин.

Количество токсичных компонентов (г/испытание) в отработавших газах, собранных за время испытания в емкостях газоотборного устройства,

$$G_{т.к} = 0,359 V_r [(p_r - p_s)/(273 + t_r)] c_{т.к} \rho_{т.к},$$

где V_r — замеренный объем газов, л; p_r и t_r — средние значения соответственно давления (мм рт. ст.) и температуры ($^{\circ}\text{C}$) в начале и в конце откачивания газа из емкости; p_s — парциальное давление насыщенных паров воды при температуре t_r , мм рт. ст.; $c_{т.к}$ — содержание токсичного компонента в объемных долях; $\rho_{т.к}$ — плотность токсичного компонента, г/л (см. табл. X.2).

Если концентрация CO и $C_n H_m$ выражена в % об. или в чнм (ppm), то в формулу вводят соответствующие множители 1/100 и 1/1 000 000.

Нормы на допускаемые количества токсичных веществ на испытание I приведены в табл. X.4.

Испытание II проводят на минимальных оборотах холостого хода, установленных заводом-изготовителем с предварительным прогревом двигателя до нормального теплового состояния. Лучше это делать на горячем двигателе сразу же по завершении испытания I. Зонд-газоотборник вводят в выпускную трубу глушителя автомобиля на глубину 0,6 м (при меньшей длине трубы ее удлинляют) и непрерывно отбираемые пробы анализируют в быстродействующем инфракрасном газоанализаторе на содержание CO и CO₂.

Возможное разбавление отработавших газов воздухом вследствие подсоса его из окружающей среды рекомендуется учитывать пересчетом по формуле

$$c_{CO} = c_{CO} [15/(c_{CO} + c_{CO_2})],$$

где c_{CO} — искомая концентрация окиси углерода CO в отработавших газах, % объемные; c_{CO} и c_{CO_2} — концентрации окиси и двуокиси углерода по результатам анализа, % объемные.

Предельно допускаемое при испытании II содержание CO в отработавших газах двигателей в странах Европы, в Америке и Японии в ближайшие годы не должно превышать 4,5%.

Аналогичный метод испытания двигателей на минимальных оборотах холостого хода и такой же уровень токсичности газов установлены в СССР (ГОСТ 16533—70), но дополнительно предусмотрено еще испытание на больших оборотах холостого хода, составляющих $0,6 n_{ном} \pm 100$ об/мин. По истечении 1 мин работы двигателя на данном режиме содержание CO в отработавших газах не должно быть более 2%. На малых и больших оборотах холостого хода допускается также отбор проб из зоны, отстоящей на 150 мм от среза выпускной трубы

автомобиля, включая легковые, грузовые машины и автобусы с бензиновыми двигателями. При этом содержание СО в газах должно быть в пределах 2% по объему.

Испытание III применяют только к двигателям с открытой системой вентиляции картера, выдержавшим испытания I и II, с целью определения выброса $C_n H_m$ с картерными газами прогретого двигателя на холостом ходу и в условиях имитации движения автомобиля

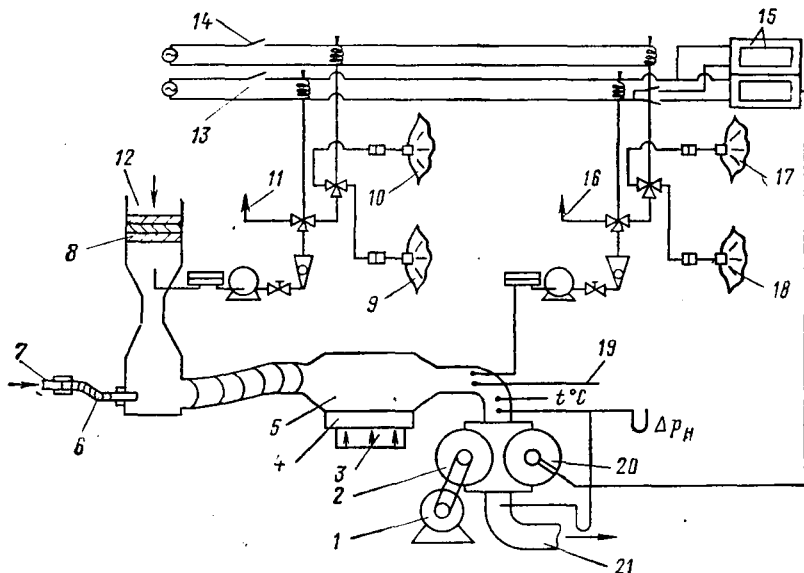


Рис. X. 3. Газоотборное устройство, обеспечивающее разбавление отработавших газов атмосферным воздухом до постоянного объема (расхода) на всех режимах работы

со скоростью 50 км/ч на стенде с беговыми барабанами при малых и средних нагрузках двигателя.

Концентрацию углеводородов в картерных газах, найденную по результатам анализа с применением инфракрасного анализатора или хроматографа, умножают на коэффициент 1,24, учитывая этим неизбежный вынос в атмосферу паров и аэрозолей масла с потоком картерных газов. Общий выброс углеводородов с картерными газами не должен превышать 0,15% от расхода топлива.

Метод сбора всех газов в эластичные емкости, рекомендованный Правилами, наряду с преимуществами, как отмечалось ранее, имеет досадные недостатки, которые особенно резко проявляются в случаях высокой концентрации токсичных компонентов. Чтобы устранить или ослабить влияние утечек, химических реакций и конденсации влаги, газы разбавляют чистым воздухом. Многократное разбавление, как отмечалось ранее, уменьшает диффузию газа во внешнюю среду, исключает взаимодействие компонентов газа и конденсацию влаги на стенках емкости, но требует более сложных газоотборных устройств

типа известных пробоотборных устройств с постоянным объемом (CVS — constant volume sampler).

Газоотборное устройство с постоянным объемом CVS, схематично показанное на рис. X. 3, характеризуется тем, что в него вводят все отработавшие газы двигателя и разбавляют их воздухом в 8–10-кратном размере и более, сохраняя суммарный расход постоянным на всех режимах испытаний.

Газы из выпускной трубы 7 глушителя автомобиля по гибкому рукаву 6 поступают в теплообменник 5, в который через ввод 12 поступает также воздух, предварительно очищенный в фильтре 8, имеющем слой активированного древесного угля, поглощающий углеводороды, вносимые воздухом. Смесь газов и воздуха просасывается объемным насосом 2, действующим от электромотора 1. С целью контроля за истинным объемом смеси, выбрасываемым в атмосферу через трубу 21, ее температуру поддерживают постоянной с помощью подогревателя 4 и охладителя 3, а число оборотов ротора насоса фиксируют датчиком 20 и суммарными счетчиками 15.

В систему включены еще два малых насоса, которые используют для заполнения смесью и чистым воздухом соответствующих эластичных емкостей 10 и 17 на неустановившихся и емкостей 9 и 18 на установившихся режимах работы двигателя. Подключение емкостей осуществляют через электромагнитные клапаны, управляемые выключателями 14 и 13. Для отбора разовых проб из емкостей и сброса из них смеси и воздуха служат вентили с патрубками 11 и 16. При непрерывном отборе проб газоанализатор подключают к заборнику 19. Наблюдения за перепадом давлений до и после насоса и температурой смеси на входе в насос ведут с помощью пьезометра и термометра, показанных на схеме.

Параллельный сбор и анализ разбавляющего воздуха повышает точность результатов обследования токсичности двигателя, но требует применения газоанализаторов повышенной чувствительности (например, «Хориба» модели МЕХА-77 или МЕХА-2000). В американской и японской практике способ опробования CVS принят в качестве стандартного.

Обследование токсичности двигателей в стендовых условиях можно также проводить по методу имитации принятого ездового цикла, если тормозная установка оснащена необходимым оборудованием с программным управлением. Однако в практике лабораторных исследований вопросы токсичности часто изучают по специальным методикам, а токсичность оценивают по концентрации компонентов в % по объему и в единицах массы на единицу времени и даже на единицу мощности двигателя в час.

Количество отдельных токсичных компонентов (кг/ч), выделяющихся в единицу времени [7],

$$G_{т.к} = G_t (\alpha I_0 + 1 - 9H_t) (\mu_{т.к}/\mu_r) c_{т.к},$$

где G_t — расход топлива, кг/ч; α — коэффициент избытка воздуха, подсчитанный по замеренным расходам G_b и G_t ; μ_r — молекулярная масса сухих отработавших газов, определяемая по способу, из-

ложенному ранее (см. § IX.4); $\mu_{т.к}$ — молекулярная масса данного токсичного компонента (см. табл. X.2); $c_{т.к}$ — объемная доля токсичного компонента, взятая по анализу; H_t — доля водорода в топливе.

Для пересчета в объемные доли концентрации токсичных компонентов $g_{т.к}$ (мг/л), выраженной по результатам анализа в единицах массы, следует пользоваться зависимостью между $c_{т.к}$ и $g_{т.к}$, приведенной в § IX.3.

Результаты исследования токсичности двигателей целесообразно бывает сопоставлять по суммарной токсичности газов, которую определяют из условий приведения каждого токсичного компонента к токсичности окиси углерода CO с учетом предельно допускаемой среднесуточной концентрации этих компонентов в атмосфере. Тогда

$$G^{CO} = \sum_{т.к} (g_{CO}^0 / g_{т.к}^0) G_{т.к},$$

где G^{CO} — суммарное количество токсичных веществ, приведенное к токсичности CO; g_{CO}^0 и $g_{т.к}^0$ — предельно допускаемые концентрации CO и данного токсичного компонента в атмосфере (см. табл. X.2); $G_{т.к}$ — масса данного токсичного компонента, найденная по результатам анализа.

Отношение $g_{CO}^0 / g_{т.к}^0$ является коэффициентом приведения и показывает, во сколько раз окись углерода CO токсичнее или менее токсична данного токсичного вещества.

Для оценки эффективности отдельных противотоксичных мероприятий при сравнительных испытаниях определенные удобства имеет и так называемый показатель удельной токсичности двигателей g^{CO} , представляющий собой отношение суммарного количества выбрасываемых двигателем токсичных веществ к развиваемой им мощности на данном режиме работы [г/(э. л. с·ч)]:

$$g^{CO} = (G^{CO} / N_e) 1000.$$

Определение количества канцерогенных веществ в газах наиболее трудоемко и сложно. Природа образования и накопления этих веществ в отработавших и картерных газах двигателей не совсем еще ясна. Нет и общепринятой методики их обнаружения в газах. Известно, однако, что двигатели внутреннего сгорания выбрасывают в атмосферу наиболее распространенные из данной группы веществ полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и в том числе самый токсичный из них бенз-а-пирен (БАП) $C_{20}H_{12}$, часто совместно с бенз-а-антраценом и фенолом, усиливающим действие канцерогенных веществ, которые обладают особенно опасными свойствами накапливаться в организме человека и стимулировать злокачественные образования.

В обычных условиях БАП представляет собой твердые кристаллы желтого цвета, которые плавятся при 179°C , а в жидкой фазе он кипит при 312°C . Поэтому в отработавших газах БАП может находиться в твердом, жидком и газообразном состояниях, что затрудняет

улавливание его из потока газов и порождает погрешности вследствие частичного выпадения на стенки трубопроводов и др.

Для определения количества БАП практикуют фильтрацию всего потока газов с предварительным охлаждением в теплообменнике до $105 \div 110^\circ \text{C}$. Однако газовая фаза при этом не улавливается фильтром, а дальнейшее понижение температуры приводит к нежелательной конденсации влаги на фильтрующем элементе. Более простой

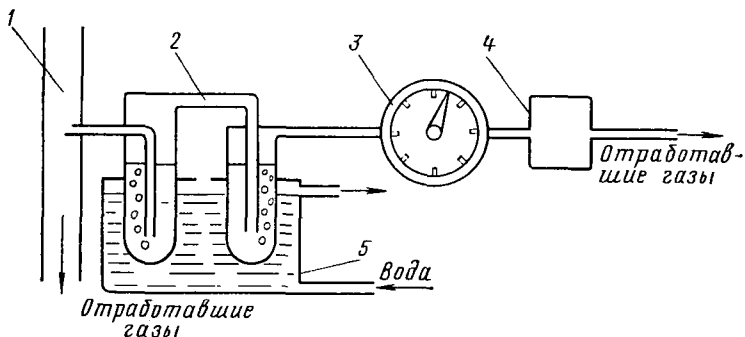


Рис. X.4. Опробовательная система на содержание канцерогенных веществ с частичным забором газа

способ улавливания БАП описан в работе [23], по которому только небольшую часть газов непрерывно просасывают через охлаждаемые ловушки, заполненные поглотителем ПАУ (включая его газообразную фазу), например бензолом.

Одна из возможных простейших опробовательных систем на содержание канцерогенных веществ с частичным забором газа показана на рис. X.4. Через две, а лучше через три ее ловушки 2, содержащие примерно по 16 см^3 бензола и помещенные в ванну 5 с проточной водой, просасывают 5 л исследуемого газа при установившемся режиме работы двигателя. Побудителем расхода газов может служить бачок, заполняемый водой, скорость вытекания которой регулируют из расчета расхода 5 л за 20 мин. Если для этого пользуются насосом 4, то расход газа определяют с помощью барабанного счетчика 3 с водяным затвором типа ГСБ-400 (кл. I). Предпочтительнее вариант с бачком.

Ловушки целесообразно размещать в непосредственной близости от двигателя, так как в длинных газоподводящих каналах часть ПАУ осаждается на стенках. Пробоотборник 1 в данном случае целесообразно вводить в поток исследуемого газа открытым концом против его течения.

На рис. X.5 показана усложненная опробовательная система, позволяющая все газы за цикл испытаний исследовать на содержание ПАУ [70]. Из глушителя 1 через клапан 3 газы направляются в охладитель 4, теплообменник 5 и фильтр 6, имеющий поверхность $0,74 \text{ м}^2$. Далее они проходят через мерные шайбы 7, причем 8% из них направляются в скруббер 8, где орошаются изопропанолукло-

гексаном. Конденсат воды собирают в емкость 11. Свободный выпуск осуществляют через трубопровод 13, а пробоотборник 2 используют для непрерывного отбора проб газа и обычного анализа его в быстродействующих газоанализаторах. Посредством насоса 12, автоматической заслонки 10 и фильтра 9 на входе в насос в системе создается разрежение, позволяющее поддерживать атмосферное давление на выходе из выпускной трубы глушителя автомобиля.

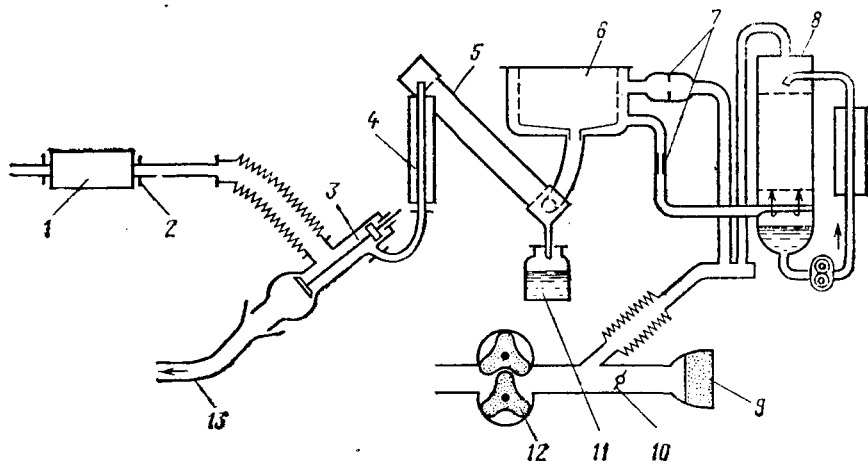


Рис. X. 5. Опробовательная система на содержание канцерогенных веществ, позволяющая все газы за цикл испытаний пропускать через улавливающие устройства

Для определения количества ПАУ, накапливающегося в системе за время испытания, фильтр, конденсат паров воды, выпускной тракт и всю аппаратуру системы промывают циклогексаном с последующей отгонкой воды и растворителя. Полученное количество ПАУ корректируют по данным анализа орошающей жидкости из скруббера 8.

Рассмотренная система наиболее полно учитывает физико-химические свойства ПАУ, так как позволяет сочетать фильтрацию всего потока газов с предварительным охлаждением и сбором конденсата и орошение небольшой части газов жидкостью-поглотителем. К тому же система приспособлена для проведения испытаний автомобилей по ездовому циклу.

§ X.3. Измерение дымности отработавших газов

Отработавшие газы, образующие цветной шлейф по выходе из двигателя, выносят в атмосферу некоторое количество сажистых и других дисперсных частиц, вследствие чего они утрачивают присущую им прозрачность, свидетельствуя о неудовлетворительности протекания рабочих процессов. Голубовато-синеватые оттенки газы приобретают, когда содержат преимущественно аэрозоли масла и топлива, а черную окраску им придают частицы сажи. Черный дым свойствен

в основном дизелям, смесеобразование в которых значительно хуже качества смесеобразования в карбюраторных двигателях. Голубоватосиний более присущ двухтактным карбюраторным двигателям, работающим на смеси бензина с маслом, а также четырехтактным, когда излишне много проникает масла в их камеры сгорания или в случаях работы на обогащенных смесях.

Большая дымность отработавших газов недопустима, как и повышенное содержание других токсичных компонентов. Поэтому норми-

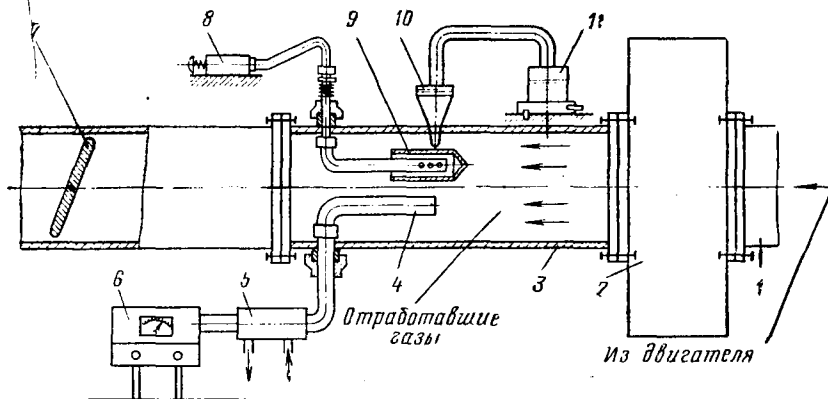


Рис. X.6. Газоотборные устройства дымометров «Бош», ИД-1 и типа «Хартридж»

рованию дымности и методам ее оценки в настоящее время уделяют исключительное внимание. Как правило, нормируют дымность дизелей, для которых определенная степень задымленности газов является характерным показателем, особенно на режимах полных нагрузок. Дымность дизелей в значительной мере предопределяется техническим состоянием двигателя и топливной аппаратуры, а также фракционным и групповым составом топлива. Преобладание в топливе тяжелых фракций и ароматических углеводородов повышает дымность отработавших газов [9].

Существующие приборы-дымометры по принципу их действия разделяют на две группы, основанные на фильтрации газа или на просвечивании его. Из приборов первой группы широко известны дымометры «Бош» и ИД-1 конструкции НАМИ; из второй — дымометры типа «Хартридж».

Дымометры типа «Бош» позволяют оценивать задымленность газов по степени отражения света поверхностью фильтровальной бумаги, покрываемой слоем сажи вследствие просасывания через нее заданного объема отработавших газов. Шкалу их градуируют так, чтобы при фотометрировании образца нулевая отметка соответствовала чистой фильтровальной бумаге, а предельная — полному поглощению света, характеризующему 100%-ную дымность (в приборах ИД-1). Точность рассматриваемых приборов во многом зависит от толщины и свойств фильтровальной бумаги, пропорциональности изменения

оптической плотности фильтра в диапазоне измерений и параметров потока, предопределяющих количественное содержание газов в объеме пробы.

Для приборов «Бош» объем пробы составляет 330 см³. Эту пробу отбирают из выпускного трубопровода насосом-дозатором 8 через зонд 9 (рис. X.6). В приборах ИД-1 пробу объемом 1 л отмеривают

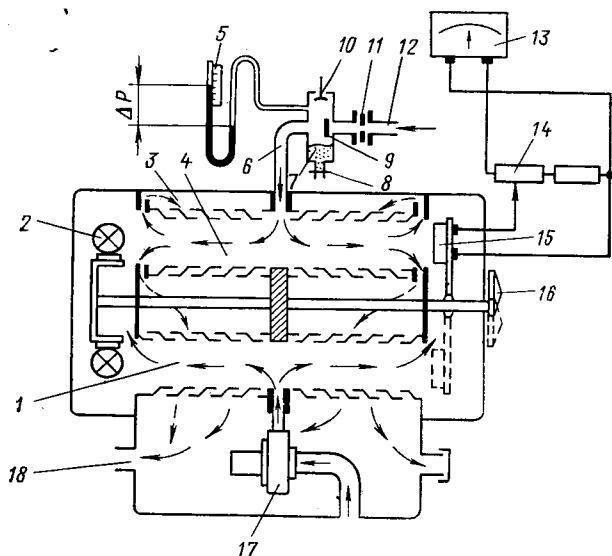


Рис. X. 7. Дымомер типа «Хартридж»:

1 — сравнительный канал; 2 — источник света; 3 — кольцевая полость для отвода газов; 4 — рабочий канал; 5 — пьезометр; 6 — патрубок ввода; 7 — золотник и водоотделитель; 8 — кран для слива конденсата; 9 — отражатель; 10 — клапан переключной; 11 — регулировочный вентиль; 12 — патрубок ввода отработавших газов из двигателя; 13 — микроамперметр; 14 — регулировочное сопротивление; 15 — фотозащелка; 16 — переводной рычаг; 17 — вентилятор для подачи воздуха в сравнительный канал; 18 — патрубок выхода газов в атмосферу (с двух сторон)

с помощью водяного дозиметра 11, газы в который просасывают через фильтрующее устройство 10. Дымомеры этого типа не отличаются высокой точностью, но оставляют испытателю документ, позволяющий сопоставлять результаты измерений, причем дымомер «Бош» отличается портативностью и может применяться даже в ходовых условиях как контрольный прибор.

Дымомеры типа «Хартридж» оценивают относительную задымленность по оптической плотности самого газа при просвечивании его слоя заданной толщины (обычно 0,5 м).

Прибор «Хартридж» имеет равномерную шкалу измерения, разделенную на 100 единиц. Газоотборник его выполнен в виде открытой трубки 4 с внутренним сечением примерно 0,05 от сечения выпускной трубки 3. Размещают ее в зоне прямого участка трубопровода по оси потока (на рисунке она смещена) и навстречу движению отработавших

газов. Чтобы повысить стабильность показаний прибора, принимают ряд мер. Для уменьшения влияния пульсации потока на выходе из выпускного трубопровода 1 двигателя устанавливают ресивер 2; применяют дроссельную заслонку 7, с помощью которой в системе при отборе проб создают избыточное давление Δp , составляющее в измерительной камере прибора 6 не менее 50 и не более 75 мм вод. ст.; температуру газа поддерживают на уровне 70° С, используя в случае необходимости холодильник 5 [9].

Конструкция дымомера «Хартридж» (рис. X.7) представляет собой двухканальную оптическую систему, в один из каналов которой вводят отработавшие газы, пропуская их через золо- и водоотделитель, а в другой, сравнительный канал, одновременно подают чистый воздух с помощью вентилятора и поочередно просвечивают их. Источником света служит лампа накаливания с цветовой характеристикой 2800—3250 К, а в качестве приемника используют фотоэлемент. При настройке системы перед фотоэлементом располагают фильтр с известными характеристиками светопоглощения, отклонения от которых не должны превышать двух делений шкалы прибора.

Испытания дизелей на дымность отработавших газов по методике НАМИ проводят на режимах внешней скоростной характеристики и разгоне с отключенным тормозом. В первом случае делают по три измерения на каждом режиме и берут для оценки дымности средние значения показаний прибора. После этого сразу же обследуют режим разгона, фиксируя наибольшие показания прибора при изменении скорости от минимальных до максимальных оборотов холостого хода и вновь наблюдают показания при уменьшении оборотов вала до исходных минимальных, повторяя циклы шесть раз. За уровень дымности принимают среднее арифметическое из восьми последних показаний прибора. Отклонения между отдельными замерами не должны превышать четырех единиц шкалы прибора. Перед каждым замером стрелку прибора устанавливают в нулевое положение и, если по окончании замера она не возвращается на нуль более чем на одно деление, то замер повторяют.

Предельно допускаемые нормы дымности дизелей при полной нагрузке составляют 40÷45 единиц (соответственно 50÷55% и 3÷3,5 ед. по ИД-1 и «Бош»). На холостом ходу дымность составляет 5--20% по шкале ИД-1 и практически не зависит от способа смесеобразования [9].

§ XI.1. Общие
сведения

Индицированием называют процессы, связанные с записью быстроизменяющихся давлений в цилиндрах, каналах и внутренних полостях двигателей, например, в трубопроводах системы питания, картерной полости и др. В применении к цилиндрам двигателя такие записи называют *индикаторными диаграммами*, в других случаях — *осциллограммами*, поскольку записи ведут обычно с помощью осциллографов.

Индикаторные диаграммы давлений в цилиндрах позволяют с наибольшей надежностью определять среднее индикаторное давление в них и, следовательно, индикаторную мощность двигателя, оценивать особенности отдельных рабочих процессов, механические потери на трение в двигателе, жесткость его работы, температуру рабочего тела и т. д.

Индицирование выпускного трубопровода двигателя позволяет, например, определять значения мгновенных температур потока, плотность и расход газа, если записи полных и статических давлений сделаны одновременно для двух принятых сечений трубопровода [43].

Устройства для записи быстроизменяющихся давлений называют *индикаторами*. По принципу действия их разделяют на электрические и пневмоэлектрические, или стробоскопические (точечные). Ранее для тихоходных двигателей применяли также механические индикаторы [12, 55].

Электрические устройства индицирования обеспечивают запись мгновенных давлений в цилиндрах за каждый рабочий цикл двигателя, т. е. позволяют получать одноцикловую диаграмму. Стробоскопические последовательно фиксируют давления, относящиеся к отдельным точкам индикаторной диаграммы за время протекания сотен циклов, обеспечивая, таким образом, получение многоцикловых диаграмм.

Основными звеньями любых индикаторов являются датчики давления и регистрирующие приборы. В электрических индикаторах для регистрации используют магнитоэлектрические, но чаще всего электронные (катодные) осциллографы общего назначения, принцип действия которых ранее был рассмотрен (гл. III).

Давления на диаграммах (осциллограммах) записывают в функции

времени, угла поворота вала двигателя, хода поршня или объема цилиндра. В процессе индицирования на поле диаграммы наносят отметки мертвых точек, момента подачи искры или топлива в цилиндры, времени в долях секунды и делают другие записи, необходимые для последующей обработки диаграмм ручным или машинным способами. Однако ручная обработка диаграмм с помощью логарифмических линеек или клавишных счетных машин очень трудоемка и непригодна для анализа индикаторных показателей двигателя в большом объеме. Поэтому в настоящее время применяют ЭВМ, позволяющие, кроме всего, оперативно осуществлять контроль в ходе самого эксперимента за всеми получаемыми показателями, включая и те, для определения которых требуется особенно большой объем вычислительной работы.

Приемы ручной обработки индикаторных диаграмм детально освещены в литературе [10, 42, 52, 55, 58], поэтому далее рассмотрен только вариант использования для этих целей ЭВМ.

§ XI.2. Электрические индикаторы

Индикаторы этого типа основаны на применении или магнитоэлектрических, или электронных осциллографов. На рис. XI.1 по-

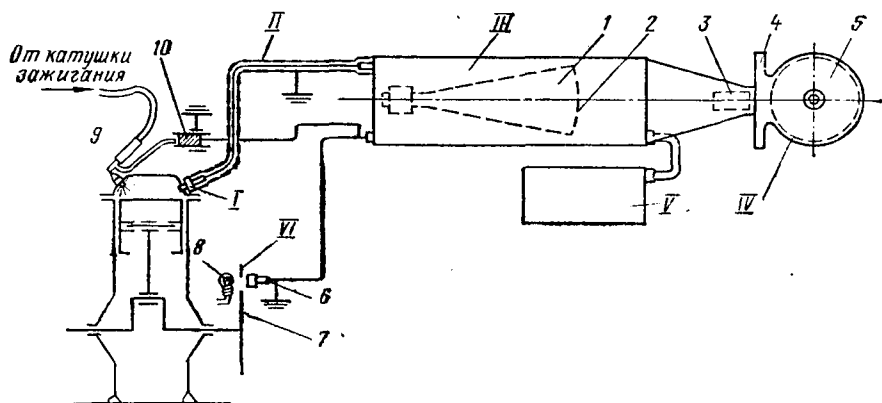


Рис. XI.1. Схема электрического индикатора с пьезокварцевым датчиком:

1 — двухлучевая катодная трубка; 2 — флуоресцирующий экран; 3 — фотообъектив; 4 — кассета фотоприставки; 5 — вращающийся барабан с фоточувствительным материалом; 6 — фотоэлемент; 7 — вращающийся диск с отверстием для отметок в. м. т.; 8 — лампа; 9 — стандартное сопротивление против радиопомех на 10 кОм; 10 — емкостный отметчик момента зажигания

казана схема типичного индикатора, состоящего из пьезокварцевого датчика I, коаксиального соединительного кабеля II, катодного (электронного) осциллографа III с усилителями постоянного тока для сигналов от двух датчиков, фотоприставки IV, блока питания V и фотоэлектрического отметчика VI, фиксирующего на диаграмме положение в. м. т. [59]. Иногда параллельно применяют оба типа

осциллографов: магнитоэлектрический для записи давлений, а катодный для визуального наблюдения за процессами в индицируемой полости. Широко используют также двухлучевые электронные осциллографы с фотоприставками, позволяющие одновременно записывать сигналы от двух датчиков, основного и вспомогательного. Последний служит для нанесения различных отметок на диаграмме и включается,

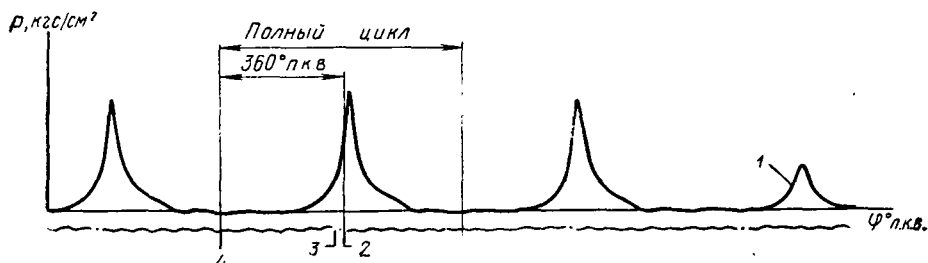


Рис. XI.2. Одноцикловая индикаторная диаграмма:

1 — цикл без зажигания; 2 — в. м. т.; 3 — отметка подачи искры; 4 — н. м. т.

например, по схеме, изображенной на рис. XI.1. В группе двухлучевых или двухканальных известны, в частности, электронные индикаторы «Орион» (Венгрия), «Тесла» (ЧССР) и «Диза Электроник» (Дания). Последний отличается универсальностью назначения и наличием легкоъемных усилителей, работающих с датчиками различных типов, что расширяет его возможности [58].

Электронные индикаторы допускают запись давлений как по углу поворота вала двигателя, так и в зависимости от хода поршня, если на пластины горизонтальной развертки осциллографа подается напряжение, пропорциональное пути, пройденному поршнем. Способы, обеспечивающие это, подробно изложены в литературе [10, 55]. Диаграммы, воспроизводимые на экране электроннолучевой трубки, регистрируют на киноплёнку, протягиваемую вращающимся барабаном синхронно с работой двигателя и скоростью съемки. В результате получают серию одноцикловых диаграмм (рис. XI.2). Но наиболее четкое изображение можно получить при фотографировании одиночных диаграмм, когда время экспозиции принимает лишь немногим больше длительности одного рабочего цикла двигателя [59].

Однако оба упомянутых способа записи диаграмм не совсем полно характеризуют исследуемый процесс, если для обработки результатов брать одиночные диаграммы. Вследствие влияния различных случайных причин давления, фиксируемые в последовательных циклах, могут заметно отличаться друг от друга. Поэтому возникает необходимость в осреднении нескольких десятков диаграмм, а это усложняет обработку результатов индицирования, особенно при ручном счете. Чтобы упростить задачу, при использовании электронных индикаторов прибегают к регистрации диаграмм на неподвижную пленку, а в случае применения магнитоэлектрических устройств осреднения достигают путем наложения большого числа диаграмм на один и тот же участок пленки или фотобумаги.

Для развертывания диаграммы по времени в индикаторе (рис. XI.1) служит генератор пилообразных сигналов, состоящий из колебательного контура, образуемого конденсаторами и тиратроном с холодным катодом. Конденсатор, включаемый параллельно тиратрону, заряжается до величины потенциала, при котором происходит зажигание тиратрона, вызывающее быструю разрядку конденсатора. В результате потенциал, возникающий на обкладках конденсатора, поступает на пластины горизонтального отклонения луча осциллографа. Поэтому время, затрачиваемое на последующую зарядку конденсатора, а следовательно, и частота горизонтальной развертки предопределяются емкостью конденсатора.

При фотографировании диаграмм горизонтальную пилообразную развертку осциллографа выключают, вследствие чего лучи совершают только вертикальные перемещения, а развертка диаграммы обеспечивается равномерностью вращения барабана с фотопленкой.

Для воспроизведения входных сигналов с возможно большей точностью осциллографа, так же как и датчики индикаторов, должны обладать высокой частотой собственных колебаний и соответствующими амплитудными характеристиками (см. табл. III.4).

Кроме высокой собственной частоты колебаний, датчики должны отвечать еще специфике быстроходных автомобильных и тракторных двигателей, имеющих относительно малый объем цилиндров и большие степени сжатия. В частности, от них требуется высокий уровень сигнала с линейной зависимостью его от давления, малая чувствительность к вибрации и изменению температурного режима, приемлемые размеры и стабильность характеристики при достаточном ресурсе работы. По данным [59], мембрана датчика должна находиться заподлицо с внутренней поверхностью стенок камеры сгорания. Наличие каких-либо соединительных каналов нежелательно, поскольку в таких каналах возможно образование резонансных волн давления, искажающих диаграмму, а также вследствие неизбежного увеличения объема камеры сгорания двигателей.

Частоту собственных колебаний датчика подбирают из условий, чтобы она заведомо превышала частоту гармоник наивысшего порядка из числа составляющих диаграмму исследуемого процесса. С учетом этих обстоятельств и уточняют полосы частот, обеспечивающих надежную регистрацию индикаторных диаграмм. Опыт свидетельствует [59], что наиболее полно диаграмма может быть записана при учете гармоник не ниже 150 порядка. Следовательно, верхний предел полосы частот (Гц), которую должен пропускать датчик, а также в целом индикатор:

для двухтактного двигателя

$$f = (n/60) 150,$$

для четырехтактного двигателя

$$f = [n/(2 \cdot 60)] 150,$$

где n — скорость вращения коленчатого вала в минуту.

Очевидно, для двухтактного дизеля, работающего при $n=2000$ —

4000 об/мин, требуется частота порядка 5000—10 000 Гц, а для четырехтактного — соответственно 2500—5000 Гц.

Двигатели с внешним смесеобразованием, как правило, имеют меньшую скорость нарастания давления в процессе сгорания, что снижает верхний предел полосы частот. Однако, учитывая их быстроходность (4000—8000 об/мин), следует принимать верхний предел полосы частот такой же, как для дизелей. Таким образом, с учетом необходимого двукратного запаса частота собственных колебаний датчика должна быть не ниже 10—20 кГц, иначе не может быть гарантирована неискаженная запись индикаторной диаграммы.

Для индицирования быстроходных двигателей применяют пьезоэлектрические, емкостные, тензометрические и другие датчики, в связи с чем электрические индикаторы подразделяют соответственно на *пьезоэлектрические, емкостные* и т. д.

Наилучшими динамическими качествами из них обладают емкостные, в которых упругим элементом служит мембрана, не связанная механически с преобразователем. Близкими к ним свойствами обладают тензодатчики с непосредственным размещением преобразователя на мембране. Частота (с^{-1}) собственных колебаний круглых мембран таких датчиков с массой единицы площади $\rho_s = \text{кгс} \cdot \text{с}^2 / \text{см}^3$ при малых перемещениях [49]:

$$f = \omega_m / 2\pi = (\alpha_1 / 2\pi) (\delta / R_m^2) \sqrt{E / [12\rho (1 - \mu^2)]},$$

где ω_m — круговая частота собственных колебаний круглой мембраны, $1/\text{с}$; δ и R_m — толщина и радиус круглой мембраны, заземляемой по контуру, см; $\rho = \rho_s / \delta = \gamma / g$ — массовая плотность материала мембраны, $\text{кгс} \cdot \text{с}^2 / \text{см}^4$.

В более простом виде

$$f = \kappa (\delta / D_m^2).$$

Для мембран из стали с $E = 2 \cdot 10^6$ $\text{кгс} / \text{см}^2$, $\gamma = 7,85$ $\text{тс} / \text{м}^3$, $\alpha_1 = 10,21$ и $\mu = 0,3$ коэффициент $\kappa = 1 \cdot 10^6$ $\text{см} / \text{с}$.

Собственная частота пьезодатчиков обычно не превышает 40 кГц, а тензодатчиков, в которых мембрана разделена с преобразователем, — около 20 кГц и только в отдельных случаях достигает 50 кГц [58].

Определенные трудности вызывает необходимость охлаждения датчиков, так как электрические свойства, например кварцевых кристаллов, начинают заметно изменяться с увеличением температуры до 150° С и более [59]. В практике индицирования применяют поэтому датчики охлаждаемые (рис. XI.3, а), но иногда и с охлаждаемой (рис. XI.3, б) мембраной. Датчик с неохлаждаемой мембраной состоит из корпуса 6 с завальцованной в его нижнюю часть мембраной 1, на которую через шаровую опору 2 непосредственно опираются два кварцевых кристалла 3 (диаметром 4,5 и толщиной 2 мм). Вывод заряда осуществляют проводником 5, изолированным от верхней опоры кристаллов стеклянной трубкой 4 и от корпуса датчика керамической трубкой 7. Общее охлаждение датчика осуществляют водой, циркулирующей в полости его рубашки.

Датчик с охлаждаемой мембраной отличается от датчика с неохлаждаемой мембраной тем, что кристаллы кварца 10 и нижняя сферическая опора 11 помещены в герметический стальной стакан 15 с дном 14, изготовленным из медной фольги толщиной 0,1 мм и плотно облегающим нижнюю опору кристаллов. Кристаллы кварца через нижнюю опору и дно стакана опираются на мембрану 13, изготовленную из инвара и прижатую к корпусу датчика гайкой 12. Охлаждающую

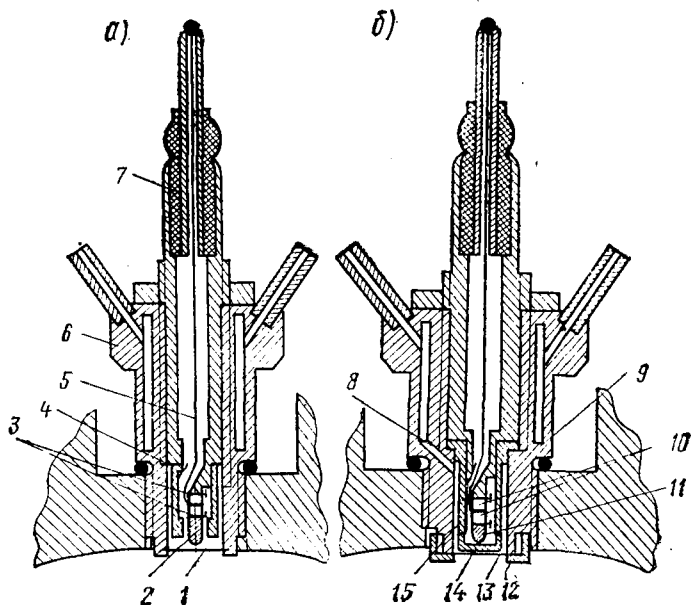


Рис. XI.3. Пьезоэлектрические датчики

щая вода по каналу 8 поступает внутрь датчика, омывает мембрану и стакан, а затем по каналу 9 выводится из датчика. Вывод заряда осуществляют так же, как в датчике с неохлаждаемой мембраной.

В настоящее время широко применяют различные малогабаритные датчики. Так, в случаях исследования переменных давлений в газовых потоках с пульсирующим движением или быстроизменяющихся процессов успешно используют индуктивные малогабаритные датчики типа ДМИ. Такие датчики вырабатывают большой выходной электрический сигнал и допускают статическую градуировку. Промышленность выпускает их для диапазонов измерений $\pm 0,1$ — 10 кгс/см^2 [49].

Для измерения быстроизменяющихся давлений в последнее время успешно применяют тензометрические датчики. На рис. XI.4 показано устройство такого датчика, разработанного Владимирским политехническим институтом для малых давлений. В стальном корпусе 11 находится гофрированная мембрана 9, изготовленная из бериллиевой бронзы толщиной 0,2 мм. Через толкатель 7 мембрана жестко

связана с упругой кольцевой балочкой 5, на которую наклеены четыре тензоэлемента сопротивления типа ФКПАЗ-100 с базой 5 мм и номинальным сопротивлением 92 Ом. Верхняя часть балочки прикреплена к ползуну 4, положение которого в корпусе регулируется гайкой 3. Штифт 1 препятствует повороту ползуна при вращении регулировочной гайки.

Тензосопротивления соединены таким образом, что все они являются рабочими плечами четырехплечего моста. Выводные проводники их присоединены к штепсельному разъему 6.

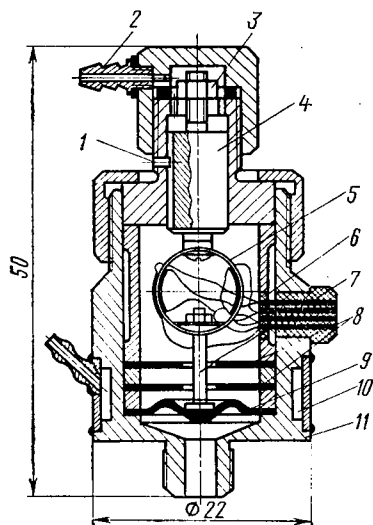


Рис. X1.4. Тензометрический датчик для малых давлений

Измеряемое давление, действуя на мембрану, вызывает деформацию балочки, которая регистрируется осциллографом с помощью тензометрической аппаратуры.

Для охлаждения датчика при установке его на горячих деталях предназначена водяная рубашка 10. Балочка с тензоэлементами защищена от нижней части корпуса двумя тепловыми экранами 8 из латуни толщиной 0,2 мм. Конструкция датчика позволяет выполнять его тарировку непосредственно на месте измерения. Для этого воздух известного давления через штуцер 2 подается в полость над мембраной.

Датчик можно применять для исследования периодически изменяющихся давлений частотой до 300 Гц. Линейность характеристики датчика (в комплекте с тензометрической уста-

новкой типа ТУЧМ) сохраняется при избыточном давлении (или разрежении) до 0,65 кгс/см².

Анализ индикаторной диаграммы начинают с определения начала видимого сгорания в цилиндре, которое соответствует отрыву линии сгорания от линии сжатия. Чтобы найти эту точку, на рабочую индикаторную диаграмму необходимо наложить диаграмму сжатия — расширения. Однако получение такой диаграммы с линией сжатия, совпадающей с линией сжатия рабочей индикаторной диаграммы, сопряжено с трудностями. Наиболее простое решение, на первый взгляд, состоит в выключении зажигания и фотографировании диаграммы сжатия — расширения методом прокрутки вала двигателя с выключенным зажиганием или без подачи топлива. Но наполнение двигателя заметно при этом изменяется, что влечет соответствующее изменение давления в цилиндре. Кроме того, трудно поддерживать строго одинаковыми скорости вращения барабана при фотографировании рабочей индикаторной диаграммы на одном снимке и диаграммы сжатия — расширения без сгорания на другом. Разные скорости вращения барабана обуславливают различные масштабы диаграмм по

углу поворота коленчатого вала, что делает невозможным их совмещение без предварительной перестройки в одинаковых масштабах, а это усложняет методику обработки диаграмм и снижает точность нахождения момента начала видимого сгорания.

Поэтому для более точного определения момента начала видимого сгорания диаграмму сжатия — расширения без сгорания смеси фотографируют на ту же пленку, на которой зафиксированы рабочие индикаторные диаграммы с минимальным возможным разрывом по времени и без остановки вращения барабана фотоприставки. Обычно эту задачу решают с помощью устройства, которое позволяет выключать зажигание в последнем периоде фотографирования и обеспечивает фоторегистрацию процессов сжатия — расширения на ту же пленку (см. рис. XI.2). Линии сжатия на диаграмме сжатия — расширения практически полностью совпадают при этом с линией сжатия рабочих циклов, что и позволяет сравнительно точно определять момент начала видимого сгорания [59].

§ XI.3. Пневмоэлектрические индикаторы

Индикаторы этого типа называют также *стробоскопическими*, или *точечными*. Запись, получаемая с их помощью, как отмечалось ранее, представляет собой усредненную по нескольким сотням циклов индикаторную диаграмму (рис. XI.5).

На рис. XI.6 представлен широко известный индикатор модели МАИ-2А, состоящий из следующих основных узлов: приемников давления (датчиков); усилителя электрического импульса (тиратронного преобразователя); регистрирующего устройства и пульта управления.

При индицировании испытуемого двигателя 13 в полость датчика 1 через распределитель 11 пневматической системы подают воздух под плавно изменяющимся давлением в пределах ожидаемого давления в цилиндре. Когда давление в цилиндре двигателя совпадает с давлением в полости датчика, или станет немного ниже, контактное устройство размыкает цепь и на выходе датчика возникает электрический сигнал, который усиливается и трансформируется в тиратронном преобразователе 16 до напряжения 14÷18 кВ. Усиленный сигнал поступает затем на разрядник 7 регистрирующего устройства 12, где образует искру, пробивающую на электротермической бумаге отверстие, видимое как черная точка. Бумагу закрепляют на барабане 9, приводимом во вращение через валик 14 и эластичные муфты от коленчатого вала индицируемого двигателя. Так как скорость изменения противодавления воздуха в датчике гораздо меньше скорости изменения давления в цилиндре, в каждом цикле лишь две точки соответствуют совпадению давления в цилиндре с противодавлением воздуха в датчике: одна точка на линии повышения давления, другая на линии его понижения. Очевидно, в каждом последующем цикле это совпадение происходит при другой величине давления и на диаграмме будут пробиты еще два отверстия и т. д.

Соответствие величины давления в цилиндре положению точки (по высоте) на регистрационной бумаге достигается тем, что разрядник регистрационного устройства перемещается вдоль образующей барабана с помощью плунжерной пары 10 пневматического устройства, в которое подается воздух одновременно и под тем же давлением, что и в полость датчика. Это пневматическое устройство нагружено точно протарированной цилиндрической пружиной 8, благодаря

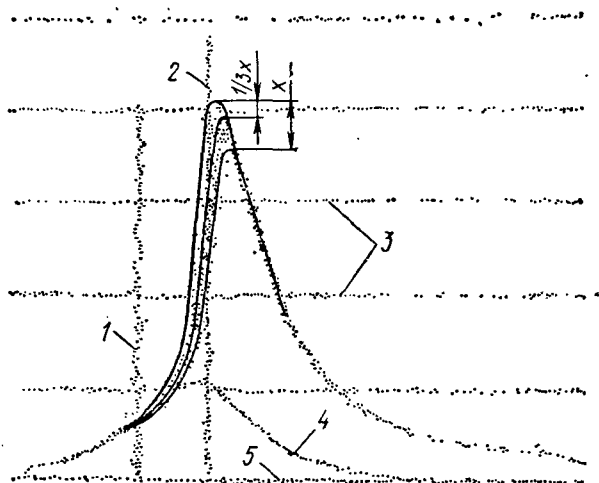


Рис. XI.5. Многоцикловая индикаторная диаграмма:
1 — зажигание; 2 — в. м. т.; 3 — линии тарировки давления;
4 — диаграмма сжатия — расширения; 5 — нулевая линия

чему разрядник ее перемещается строго пропорционально изменению давления в полости датчика. Подобрав посредством регулировочного крана определенную скорость изменения противодавления воздуха в датчике, можно получить на регистрационной бумаге серию точек (отверстий), настолько близко расположенных одна к другой, что они образуют почти непрерывную линию изменения давления в цилиндре (см. рис. XI.5).

Датчики давления для рассматриваемого индикатора изготавливают с учетом назначения. На рис. XI.7, а, б показан обычный датчик, в котором сварной корпус 1 охлаждается водой через штуцера 15 и имеет резьбовую присоединительную часть. В нижней зоне его расположен узел чувствительного элемента — мембрана 5 и ограничители 4 и 6. Узел закрепляют в корпусе гайкой 11 через латунную шайбу 10, втулку 8 и сферическую шайбу 7. Контактный штифт 9 центрируют латунной нарезной втулкой 2, изолированной от корпуса приемника текстолитовым цилиндром 3 и текстолитовой втулкой 12. На верхней части контактного штифта сделаны нарезка под стопорящую гайку 14 и квадрат для поворота контакта при установке зазора в чувствительном элементе. От повреждения гайкой 14 втулку 12 предохраняют шайбой 13. В корпус ввертывают головку 22 с резьбовым

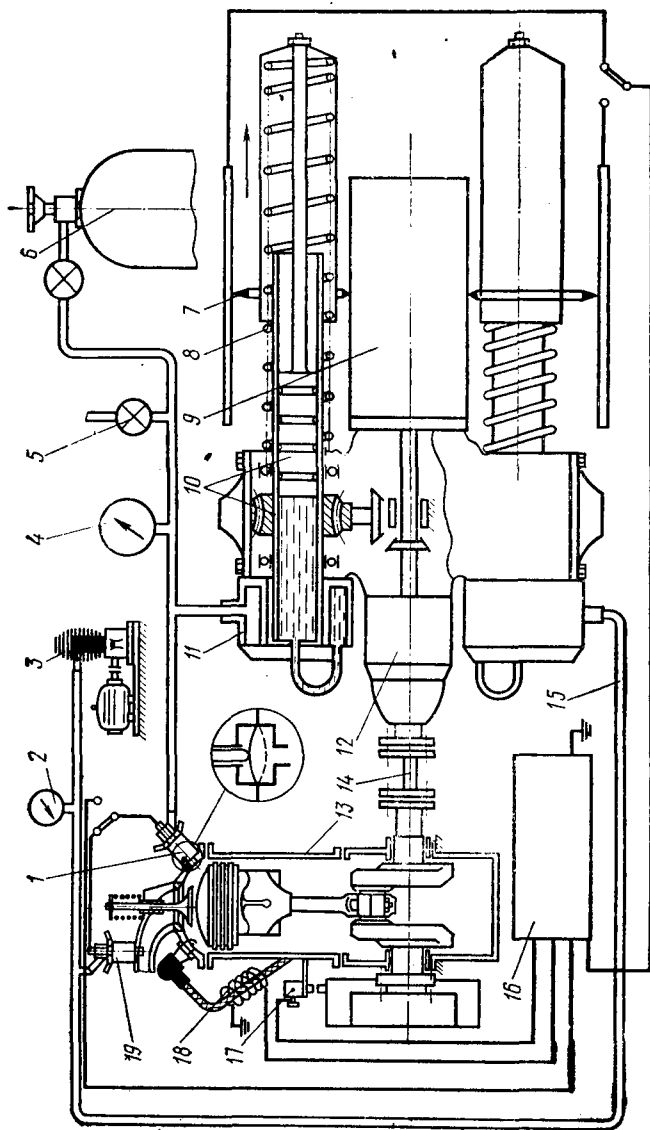


Рис. XI.6. Пневмоэлектрический индикатор МАИ-2А:

1, 19 — датчики давления; 2 — мановакуумметр; 3 — вакуумный насос; 4 — манометр; 5 — кран в атмосферу; 6 — баллон сжатого воздуха; 7 — искровой разрядник записывающей части; 8 — пружина; 9 — барaban; 10 — плунжерная пара; 11 — распределитель пневматической системы; 12 — записывающая часть индикатора; 13 — испытательный двигатель; 14 — соединительный вал в эластичными муфтами; 15 — воздухопровод; 16 — тиратронный преобразователь; 17 — индуктивный датчик; 18 — отметчик момента времени

штуцером 21, которым датчик соединяют с воздухораспределителем. Воздух проходит к мембране по радиальным отверстиям втулки 8 и

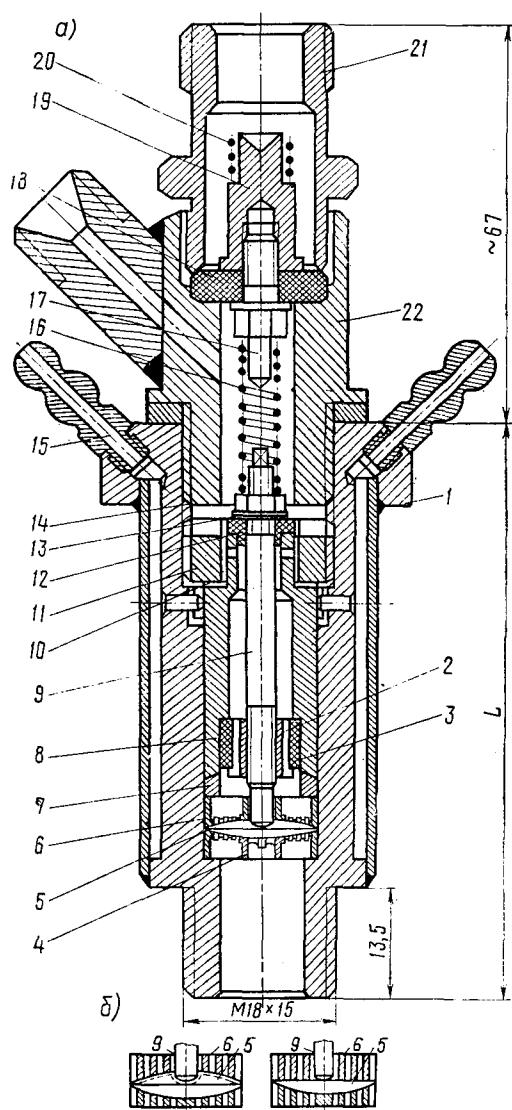


Рис. XI. 7. Датчик давления пневмоэлектрического индикатора

через пазы, сделанные во втулке 2. Штуцером 21 зажимают изоляционную шайбу 18 с закрепленным на ней выводным контактом 19 и контактным штифтом 17. Пружины 16 и 20 служат эластичными проводниками.

Центр мембраны, зажатой между ее ограничителями, может перемещаться в пределах зазора, равного $0,1 \div 0,2$ мм и образуемого внутренними сферическими поверхностями ограничителей. В верхнем положении мембрана, соприкасаясь с контактом 9, замыкает его на массу. При замыкании или размыкании контакта возникает электрический сигнал, поступающий затем в усилительное устройство (тиратронный преобразователь). Давлением, поданным из баллона со сжатым воздухом во внутреннюю полость датчика, мембрана отжимается к нижнему седлу. Но под действием повышения давления в цилиндре наступает момент, когда давление во внутренней полости датчика выравнивается, а затем становится меньше давления в цилиндре. В результате мембрана отходит от нижнего ограничителя и прижимается к верхнему, замыкая контакт 9, вследствие

чего и возникает электрический сигнал. При понижении давления в цилиндре в момент уравнивания давлений мембрана отходит от верхнего ограничителя, контакт 9 размыкается, вызывая повторный электрический сигнал.

Надежность, чувствительность и стабильность работы описанного датчика во многом зависят от конструкции и качества изготовления ограничителей и мембраны. Так, для записи низких давлений, особенно при индицировании насосных ходов или давлений во впускных и выпускных трубопроводах, рекомендуется применять несколько измененные датчики [43, 58]. Верхний ограничитель 6 хода мембраны 5 выполняют с плоской поверхностью, как показано на рис. XI.7, б. Тогда под действием давления снизу диафрагма не деформируется, а отрыв ее от контактного штифта 9 происходит при давлении, не превышающем $0,1 \text{ кгс/см}^2$ вместо обычных для них $0,3\text{--}0,5 \text{ кгс/см}^2$, оговоренных инструкцией.

Заслуживает внимания серия датчиков клапано-контактных, индуктивных и емкостных, разработанная для индикатора МАИ-2 на ЯМЗ [58]. Конструкция их учитывает индицирование верхнеклапанных двигателей. На рис. XI.8 показан клапанный датчик для индицирования верхнеклапанных двигателей с малыми размерами цилиндров.

Усилитель электрических сигналов, или тиратронный преобразователь индикатора, предназначен для формирования импульсов высокого напряжения и позволяет записывать раздельно или одновременно две линии диаграммы: линию сжатия и линию расширения (замыкание и размыкание), а также обеспечивает нанесение различных отметок от других контактных датчиков, производит отметку в.м.т. и позволяет наносить тарировочные линии давлений на диаграмму.

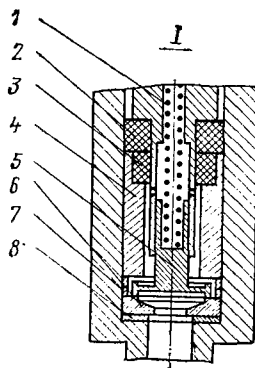
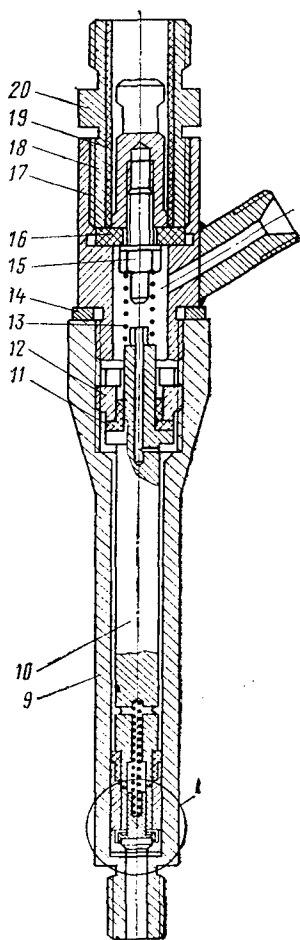


Рис. XI.8. Малогабаритный датчик давления пневмоэлектрического индикатора:

1 — пружина; 2 — кольцо; 3 — втулка; 4 — седло верхнее; 5 — клапан; 6 — седло нижнее; 7 — кольцо дистанционное; 8 — медная прокладка; 9 — корпус датчика; 10 — штанга; 11 — изолятор; 12 — гайка специальная; 13 — пружина токосъемная; 14 — шайба; 15 — болт стяжной; 16 — шайба; 17 — корпус штуцера; 18 — контакт выводной; 19 — изолятор токосъемника; 20 — колпак токосъемника

Блок питания преобразователя состоит из двух выпрямителей, подключенных к общему силовому трансформатору, имеющему пять обмоток. Первичная его обмотка рассчитана на напряжение сети 220 В, 50 Гц; повышающая обмотка и мостовой выпрямитель на диодах обеспечивают питание анодных цепей ламп и тиратронов, а для питания цепей смещения используют второй полупериодный выпрямитель.

При работе датчика давления, который создает на входе усилителя прямоугольные импульсы, тиратронный преобразователь фиксирует как момент замыкания (передний фронт импульса датчика давления), так и момент размыкания (задний фронт импульса датчика давления).

Подачу сигналов на вход преобразователя осуществляют по коаксиальным кабелям, подключаемым штепсельным разъемом, расположенным на задней панели пульта управления.

Регистрирующее устройство (см. рис. XI.6, позиции 7 ÷ 12) состоит из вращающегося барабана, на котором закрепляют лист электротермической регистрационной бумаги. По бокам этого барабана расположены два пишущих механизма с разрядными иглами. Барабан соединяют с коленчатым валом двигателя при помощи валика и эластичных муфт, обеспечивающих безударное включение барабана на время индицирования и строгую ориентировку положения барабана по отношению к коленчатому валу. Иглы разрядников регистрирующих устройств закрепляют на конце штоков плунжеров при помощи специальных держателей, изолированных от масс. Регистрирующее устройство имеет два рабочих цилиндра. Один из цилиндров, снабженный пружиной с крутой характеристикой, предназначен для снятия индикаторной диаграммы рабочих ходов, а другой, имеющий пружину с пологой характеристикой, — для индицирования насосных ходов. Это существенно упрощает и убыстряет индицирование двигателя, позволяя вести его одновременно в двух точках. С одной стороны, плунжеры в рабочих цилиндрах нагружены масштабными пружинами, а с другой — давлением воздуха, равным противодавлениям в полостях датчиков давления. При рассогласовании этих давлений плунжеры вместе с разрядниками перемещаются вдоль образующих вращающегося барабана, сжимая масштабные пружины. Равенство давлений, подаваемых в полости датчика и в цилиндры регистрирующего устройства, обеспечивает пропорциональность между высотой индикаторной диаграммы и текущими давлениями в цилиндре двигателя. Масштаб индикаторной диаграммы по давлению определяется характеристикой масштабных пружин.

§ XI.4. Тарировка индикаторов

Тарировка пневмоэлектрических индикаторов заключается в определении масштабных коэффициентов по осям — времени и давлению.

Масштабный коэффициент по оси времени (k_1 мм/°п. к. в) определяют следующим образом. На индикаторной диаграмме измеряют расстояние между двумя последующими отметками в. м. т. Затем полученное расстояние делят на 360° и определяют величину 1° поворота

коленчатого вала в мм. Поскольку обороты двигателя при индцировании всегда бывают строго определены, то легко получить и временную связь.

При тарировке пневмоэлектрических индикаторов по давлению в рабочем цилиндре регистрирующего устройства создают строго определенное давление, контролируемое по образцовому манометру. Вследствие этого разрядник перемещается вдоль образующей барабана на величину, пропорциональную данному давлению. Затем с помощью потенциометра уменьшают отрицательное смещение на управляющей сетке тиратрона до возникновения самогенерации тиратронного реле. В результате на электротермической бумаге, закрепляемой на вращающемся барабане, образуется горизонтальная точечная линия. Расстояние между полученной линией и атмосферной линией соответствует давлению в цилиндре регистрирующего устройства. Повторяя описанную операцию при различных давлениях в цилиндре регистрирующего устройства, получают сетку, определяющую масштабный коэффициент по оси давления (K_2 , мм·см²/кгс).

Однако нанесение самой атмосферной линии на диаграмму связано с известными трудностями, а допущенная неточность порождает значительные ошибки, особенно в случаях записи низких давлений. На практике это делают несколькими способами.

1. Вносят поправку к зафиксированному на диаграмме атмосферному давлению, перемещая его линию на величину, учитывающую жесткость мембраны. Недостатки этого способа очевидны, поскольку нельзя учесть различия в температурном состоянии мембраны при индцировании и тарировке, а также возможные отклонения в давлениях, требуемых для прогиба мембраны.

2. Полость датчика в процессе индцирования отключают от полости цилиндра и сообщают ее с атмосферой трехходовым краном, предназначенным для этого. Но и в этом случае не учитываются различия в температурном состоянии мембраны.

3. В камеру сгорания устанавливают специальный газоотборный клапан с гидравлическим управлением, с помощью которого в нужный момент соединяют полость цилиндра с измерительным устройством. Целесообразнее всего это делать на участках с давлениями в цилиндре, близкими к постоянным значениям, когда средние их величины могут быть легко определены с помощью жидкостного манометра. Для повышения точности рекомендуют такие отметки делать в двух-трех точках записываемого цикла.

Рассматриваемый способ достаточно точен, но затягивает индцирование по времени и требует сложной дополнительной аппаратуры. Не исключены и погрешности в связи с возможными утечками и другими неполадками в клапанном устройстве.

С целью контроля за работой газоотборного клапана и системой нанесения отметок некоторые авторы рекомендуют применять катодный осциллограф [32], но это еще в большей мере осложняет методику нанесения атмосферной линии на поле диаграммы.

Тарировка датчиков давления пневмоэлектрических индикаторов является наиболее простой. Сущность ее заключается в определении

поправок, связанных с процессами замыкания и размыкания мембраны с контактом, располагаемым обычно заподлицо с поверхностью верхнего седла. Минимальное давление замыкания и размыкания мембраны оговаривают в инструкции по эксплуатации индикатора. Так, для мембран с толщиной $\delta=0,1$ мм установлены пределы давлений $0,3 \pm 0,2$ кгс/см², причем разница в давлениях на замыкание и размыкание для данного датчика не должна превышать 0,02 кгс/см².

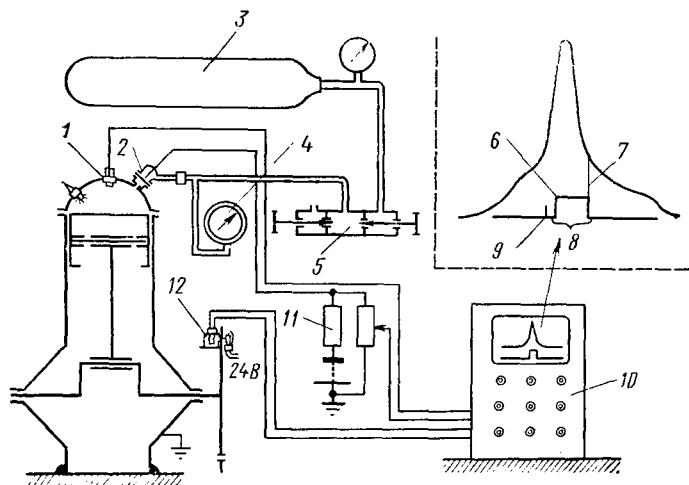


Рис. XI.9. Схема устройства для тарировки электрического индикатора в условиях работы на двигателе

Для регулировки датчика используют емкость объемом до 2 л, которая сообщена с насосом и снабжена обратным клапаном, а также вентилем быстрого сброса давления, контролируемого с помощью манометра с ценой деления его шкалы $0,01 \pm 0,02$ кгс/см². При наличии в емкости давления, превышающего давление замыкания, контакт датчика ввинчивают до соприкосновения с мембраной, о чем судят по загоранию контрольной лампы, и закрепляют контакт. Далее медленно снижают давление в емкости и фиксируют давление размыкания, после чего давление повышают и определяют давление на замыкание. И так повторяют до 10 раз, принимая за результаты среднее значение. При отклонениях, превышающих норму, датчик перебирают и вновь опробывают.

Тарировка электрических индикаторов особенно трудоемка при работе с пьезокварцевым датчиком давления. Ее можно проводить двумя способами: использованием свойств прямоугольных импульсов давлений и сопоставлением пьезокварцевого датчика с пневмоэлектрическим датчиком при параллельной их работе [59].

Для получения тарировочной характеристики, не отягощенной температурной погрешностью, применяют второй из этих методов тарировки непосредственно на работающем двигателе. Схема устрой-

ства для проведения такой тарировки показана на рис. XI.9. Сжатый воздух из баллона 3 подают через распределительный кран 5 к пневмозлектрическому датчику 2, установленному в одной камере сгорания с пьезокварцевым датчиком 1, который через схему 11 подключен к осциллографу 10. Величина давления воздуха регулируется запорными иглами крана и замеряется образцовым манометром 4 класса 0,3. При помощи пьезокварцевого датчика 1 на экране осциллографа 10

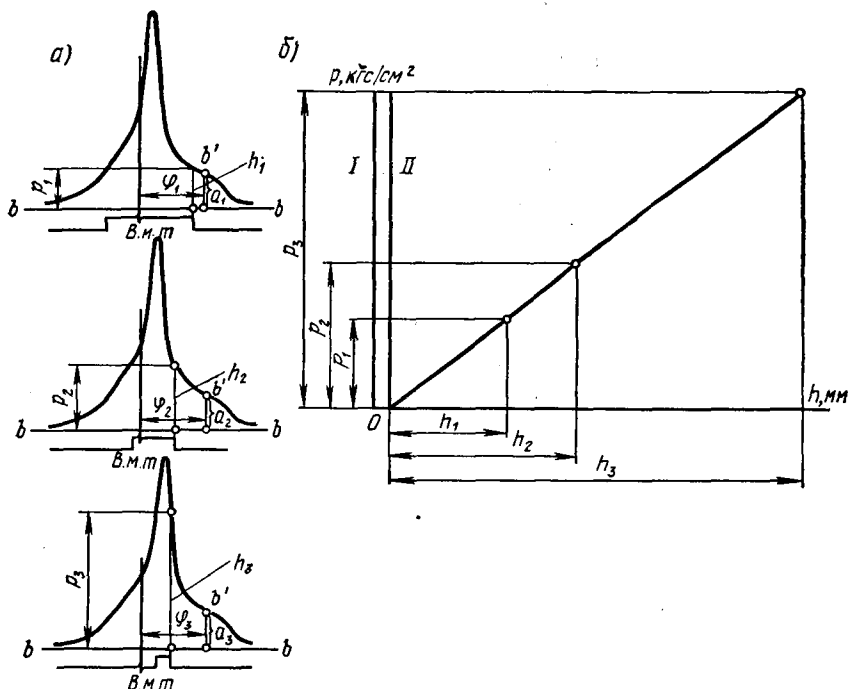


Рис. XI.10. Способ обработки индикаторной диаграммы для получения тарировочной характеристики электрического индикатора:

I — принятая линия отсчета; II — действительная атмосферная линия

регистрируют индикаторную диаграмму. На второй луч осциллографа от фотоэлектрического отметчика 12 подается отметка в.м.т. (позиция 9) и сигнал от пневмозлектрического датчика (позиция 8). В результате на экране осциллографа синхронно с индикаторной диаграммой записывается П-образный импульс тока, у которого линия возрастания соответствует замыканию (позиция 6), а линия падения тока — размыканию мембраны и контакта пневмозлектрического датчика (позиция 7). Практикой установлено, что момент размыкания контакта и мембраны практически точно соответствует моменту уравнивания давлений в цилиндре двигателя и полости датчика, в то время как момент замыкания сильно запаздывает и происходит при давлениях в цилиндре двигателя более высоких, чем в полости датчика. В связи с этим для тарировки индикаторов используют исключительно линию расширения индикаторной диаграммы.

Построение тарировочной характеристики индикатора проводят следующим образом. С помощью фотоприставки записывают на пленку несколько индикаторных диаграмм вместе с П-образным импульсом тока, причем для каждой фоторегистрации устанавливают строго определенное противодействие в полости пневмоэлектрического датчика. На каждой индикаторной диаграмме намечают определенную точку, отстоящую во всех случаях на равном расстоянии ($\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$) от в.м.т. (рис. XI.10, а). Положение этой точки выбирают за $5 \div 10^\circ$ перед открытием выпускного клапана из тех соображений, что на этом участке индикаторная диаграмма давлений очень мало зависит от неравномерности протекания процесса сгорания, особенно при работе на относительно устойчивых режимах ($\alpha = 0,85 \div 0,9$). Затем от этой точки, обозначенной на диаграммах b' , откладывают вниз равный для всех индикаторных диаграмм произвольно выбранный отрезок a ($a_1 = a_2 = a_3 = a$). Через нижний конец отрезка a проводят линию $b - b$, параллельную линии второго луча, от которой и производят отсчет, т. е. замер высоты индикаторной диаграммы. В каждом отдельном случае высоту индикаторной диаграммы определяют в точке падения тока, иначе говоря, в момент размыкания контакта и мембраны пневмоэлектрического датчика. По полученным данным строят тарировочный график (рис. XI.10, б), на котором по оси абсцисс откладывают замеренную описанным методом высоту (h_1, h_2, h_3) индикаторной диаграммы, а по оси ординат соответствующее давление (p_1, p_2, p_3) в полости пневмоэлектрического датчика. Точка пересечения полученной прямой тарировочного графика с осью абсцисс определяет действительное положение нулевой линии индикаторной диаграммы (под нулевой линией понимают линию атмосферного давления). Эту линию и принимают за начало отсчета при обработке индикаторной диаграммы.

Для датчиков электрических индикаторов других типов допускается статическая тарировка.

§ XI.5. Ошибки индицирования

В зависимости от типа индикатора ошибки при индицировании могут быть различными. Как было уже отмечено, для получения достоверной индикаторной диаграммы необходимо, чтобы частота собственных колебаний подвижных частей индикатора была достаточно велика по сравнению с угловой скоростью вращения вала двигателя. Очевидно, чем быстрее вращается двигатель, тем выше должна быть частота собственных колебаний индикатора.

Вследствие того, что в канале, сообщающем цилиндр двигателя с воспринимающим давление элементом индикатора, создается какое-то сопротивление течению газа, при снятии индикаторных диаграмм возникает некоторая разность давлений в цилиндре двигателя и в полости канала около элемента индикатора, воспринимающего давление. Величина этой разности давлений зависит от формы, длины и площади поперечного сечения канала, скорости изменения давления в цилиндре и от величины давления в цилиндре. Известно, что чем

быстроходнее двигатель и чем ниже давление газов в цилиндре, тем короче и большего сечения должен быть канал, сообщающий последний с чувствительным элементом датчика давлений. Наилучшие результаты при индцировании могут быть получены только в случае, когда воспринимающий давление чувствительный элемент индикатора расположен заподлицо со стенками индцируемой полости двигателя. В ряде конструкций это удается осуществлять путем применения соответствующих датчиков. Большое сопротивление прохождению газов оказывают краны, перекрывающие канал. Поэтому при снятии индикаторной диаграммы они должны быть полностью открыты.

Приблизительная величина погрешности от сопротивления, возникающего при прохождении газов в канале, соединяющем цилиндр двигателя с элементом, воспринимающим давление,

$$\Delta p_{\text{ик}} = [n / (1,25 \cdot 10^6)] (l_{\text{к}} / d) p_z,$$

где n — число оборотов вала двигателя в минуту; $l_{\text{к}}$ — длина соединяющего канала, мм; d — диаметр соединяющего канала, мм; p_z — давление в конце сгорания, кгс/см².

Если, например, двигатель работает под нагрузкой с $n=4000$ об/мин, а воспринимающий чувствительный элемент датчика индикатора соединен с цилиндром двигателя каналом длиной 30 и диаметром 5 мм, то при максимальном давлении, равном 50 кгс/см²,

$$\Delta p_{\text{ик}} = [4000 / (1,25 \cdot 10^6)] (30/5) 50 = 0,96 \text{ кгс/см}^2.$$

Помимо сопротивления, оказываемого протеканию газов, в соединительном канале могут возникнуть колебания давления, которые в значительной мере искажают диаграмму. На рис. XI.11 показано влияние колебаний давления в соединительном канале на характер протекания индикаторной диаграммы. Диаграмма, представленная на рис. XI.11, а, получена с датчиком давления, ввертываемом непосредственно в цилиндр двигателя без соединительного канала; диаграмма на рис. XI.11, б — при работе двигателя с детонацией, вследствие чего наблюдались небольшие колебания величины отношения dp/dt ; диаграмма на рис. XI.11, в — при условии, когда между воспринимающим давлением чувствительным элементом датчика индикатора и цилиндром двигателя имелся соединительный канал (работа с детонацией). При работе двигателя с детонацией той же интенсивности, что и в случае, представленном на рис. XI.11, б, на диаграмме наблюдаются весьма значительные колебания отношения dp/dt , вызванные влиянием соединительного канала.

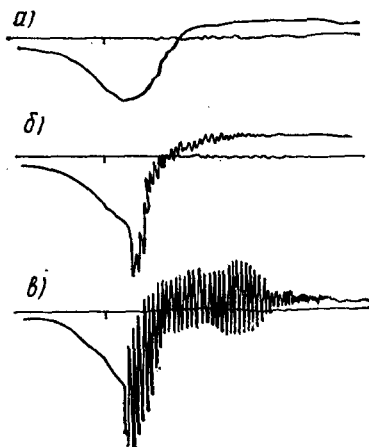


Рис. XI.11. Влияние колебаний давления в соединительном канале на протекание индикаторной диаграммы

Длинный соединительный канал между цилиндром и элементом давления индикатора можно рассматривать как трубу, закрытую с одного конца. В такой трубе под влиянием изменения давления во время сгорания возникают колебания, частота которых тем ниже, чем длиннее канал, и равна собственной частоте колебаний столба газа. ГОСТ 18509-73 рекомендует применять каналы с $l_k < d$.

При записях давлений стробоскопическими индикаторами определенные погрешности возникают вследствие затраты времени на преодоление мембраной датчика расстояния между ее ограничителями. По данным [59] время движения стальной мембраны

$$t_m = 3,06 \cdot 10^{-2} \sqrt[3]{s_m \delta / \omega_p},$$

где s_m — максимальный ход центра мембраны, см; δ — толщина ее, см; ω_p — скорость нарастания давления, кгс/(см²·с).

Следовательно, длительность перемещения мембраны уменьшается с уменьшением ее хода и толщины и с увеличением скорости изменения давления. Очевидно, при записи линии повышения давления ее изображение на диаграмме запаздывает по фазе сравнительно с истинным, а линия расширения опережает [58].

Размеры точечных индикаторных диаграмм позволяют измерять записанное давление на линии расширения и на линии конца сжатия с очень высокой точностью. Однако в начале хода сжатия при давлениях меньше 2 кгс/см² погрешность в измерениях записываемого абсолютного давления в цилиндре достигает 2÷3%. Кроме того, небольшая погрешность получается при определении величины давления конца расширения. Поэтому для определения давления начала сжатия, а также давления в конце расширения и по линиям выпуска и впуска диаграмму малых давлений снимают при помощи слабой пружины.

Весьма значительное влияние на диаграмму оказывает ошибка, допущенная при нанесении отметки положения в.м.т. Так, в результате смещения на диаграмме в.м.т. на 1° поворота коленчатого вала, ошибка при определении индикаторной мощности достигает 3%. Величина отклонения отметки в.м.т. при условии тщательного ее определения может быть сведена до $\pm 0,15^\circ$, что дает возможность уменьшить величину ошибки при определении индикаторной мощности двигателя до 0,6÷0,9%.

В случае планиметрирования индикаторной диаграммы также возможны ошибки в определении индикаторной мощности двигателя, составляющие примерно 0,5%.

Величина ошибки вследствие инерции подвижных частей индикатора бывает незначительной и не превышает 0,25%.

Ошибки при определении индикаторной мощности двигателя, возникающие в результате перестройки развернутой по углу поворота вала точечной индикаторной диаграммы в другие координаты, связаны с неточным определением масштаба пружины индикатора, а также неточного деления диаграммы на отрезки и измерения длины

ординат, выражающих величину давления на диаграмме. Эти ошибки в совокупности составляют около 0,3%.

Таким образом, суммарная величина ошибки, допускаемой при определении индикаторной мощности двигателя по точечной индикаторной диаграмме, в среднем не превышает 2,0%. Тогда как электрические индикаторы, для которых необходимы усилители, позволяют определять индикаторную мощность двигателя лишь с гораздо большей ошибкой. Поэтому пневмоэлектрические индикаторы, обеспечивающие относительно малую величину ошибки, имеют значительные преимущества по сравнению с электрическими индикаторами.

§ XI.6. Обработка индикаторных диаграмм с применением электронных вычислительных машин (ЭВМ)

Обычную обработку индикаторных диаграмм сводят к определению давлений в цилиндре двигателя по углу поворота вала в нескольких характерных для нее узловых точках. Используя исходные данные диаграмм, можно провести более детальный обсчет их параметров. Например, определить: площадь индикаторной диаграммы и среднее индикаторное давление, показатели политроп сжатия и расширения; жесткость работы двигателя; величины абсолютных температур; закономерность выделения тепла при сгорании топлива и т.д.

Для выполнения исключительно трудоемкой детальной обработки индикаторных диаграмм в настоящее время широко применяют быстроедействующие электронные вычислительные машины, которые в несколько минут выдают результаты расчетов всех важнейших показателей рабочего цикла двигателя. На практике применяют ряд расчетных методик (НАМИ, ЦНИДИ и др.). Далее приводится сравнительно несложная методика, разработанная во Владимирском политехническом институте и предусматривающая выполнение необходимых расчетов, связанных с обработкой индикаторных диаграмм на электронной цифровой вычислительной машине (ЭЦВМ).

Согласно этой и другим методикам, для целей обработки на ЭВМ индикаторную диаграмму задают в виде таблицы значений, выражающих в миллиметрах величины угла поворота вала и соответствующие им давления. Для этого индикаторную диаграмму с помощью светового ящика переносят на миллиметровую бумагу, добиваясь хорошего совмещения сантиметровой сетки миллиметровки с градусной шкалой диаграммы по оси абсцисс. Поскольку на участке сгорания вследствие неодинакового протекания последовательных циклов наблюдается разброс точек, границы их обводят плавными кривыми (см. рис. XI.5) и аккуратно проводят среднюю линию, которая и принимается в качестве расчетной. Рекомендуется вносить в таблицу значения через каждые 2° поворота коленчатого вала (п.к.в.) и отсчет угла φ поворота вести от начала такта впуска.

Далее определяют масштабы давлений m_p и углов m_φ поворота коленчатого вала, проводят атмосферную и нулевую линии, наносят характерные точки: в.м.т., начало видимого горения, фазы газо-

распределения. Затем исходные данные так же, как и программу, заносят на перфокарты и вводят в машину.

Численным дифференцированием исходной табличной зависимости $p=f(\varphi)$ находят скорость нарастания давления $\left(\frac{\text{Н/м}^2}{^\circ \text{ п. к. в.}}\right)$ в каждой точке диаграммы

$$dp/d\varphi = (p_{\varphi+h_1} - p_{\varphi-h_1})/(2h_1),$$

где h_1 — шаг вычисления, $^\circ \text{ п. к. в.}$

Среднее индикаторное давление p_i (Н/м^2), выражающее собой работу газов за один цикл, отнесенную к единице рабочего объема,

$$p_i = \int_{\varphi_a}^{\varphi_b} p (dV/d\varphi) d\varphi / (\pi D^2/4) S,$$

где D — диаметр цилиндра; S — ход поршня; V — текущий объем цилиндра, значение которого определяют по основным размерам двигателя D и S с учетом кинематики кривошипно-шатунного механизма обследуемого двигателя (м^3):

$$V = (\pi D^2/4) \{S/(\varepsilon - 1) + r[(1 - \cos \varphi) + (\lambda/4)(1 - \cos 2\varphi)]\},$$

где r — радиус кривошипа; ε — степень сжатия; $\lambda = r/l$; l — длина шатуна.

Для определения температуры, тепловыделения и других показателей цикла, как показала практика, расчет удобнее вести по отдельным характерным участкам диаграммы, ограниченным ее узловыми точками: a — конца впуска; c — конца сжатия; z — сгорания; b — конца расширения.

Участок сжатия $a-c$. Температуру газов (K) на этом участке определяют по уравнению состояния

$$T = (p/R_0)(V/G_{\text{ц}}),$$

где R_0 — газовая постоянная рабочего тела при сжатии; $G_{\text{ц}}$ — цикловое наполнение цилиндра.

Для дизелей можно принять $R_0 \approx 289$, а для карбюраторных двигателей — $275 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}$.

Средний показатель политропы за весь процесс сжатия находят по формуле, полученной логарифмированием уравнения политропы

$$n_1 = (\lg p_c - \lg p_a) / (\lg V_a - \lg V_c).$$

Если предположить, что малые участки кривой процесса сжатия подчиняются уравнению политропы с постоянным показателем $n_{1\tau}$, то величину его можно считать текущим (мгновенным) значением показателя политропы действительного сжатия в данной точке.

Выражение для вычисления $n_{1\tau}$ получим в результате дифференцирования уравнения политропы с постоянным показателем

$$n_{1\tau} = - (V/p) [(dp/d\varphi)/(dV/d\varphi)].$$

В этой формуле $dV/d\varphi$ находят дифференцированием приведенной выше зависимости, определяющей значение текущего объема цилиндра по углу поворота вала, $V=f(\varphi)$.

Участки сгорания $c-z$ и расширения $z-b$. Температура (К) на участке сгорания

$$T=(p/R)(V/G'_c),$$

где R — текущее значение газовой постоянной; G'_c — цикловое наполнение с учетом впрыснутого топлива (для дизелей).

Значение R [Дж/(кг·град)] можно приближенно вычислить по эмпирической формуле

$$R=R_0+\frac{K_\varphi}{L^2}\left\{1-\exp\left[-6,908\left(\frac{\varphi-\varphi_c}{\Delta\varphi_z}\right)^q\right]\right\}.$$

В этом уравнении сомножитель, заключенный в квадратные скобки, представляет собой математическое выражение закона выгорания топлива.

Для дизелей продолжительность сгорания может быть принята $\Delta\varphi_z=50\div 100$ и для карбюраторных двигателей $\Delta\varphi_z=40\div 60^\circ$ п. к. в., а показатель процесса сгорания q соответственно 1,3+2,0 и 3,0+5,0. Коэффициент $K_\varphi=5$ для дизельных и 15 для карбюраторных двигателей. Следует заметить, что даже значительная неточность в выборе указанных величин мало сказывается на величинах R и T .

Температуру на участке расширения $z-b$ определяют также по уравнению состояния, но, полагая R постоянной:

$$R=R_0+K_\varphi/L^2.$$

Средний показатель политропы расширения

$$n_2=(\lg p_b - \lg p_z)/(\lg V_z - \lg V_b),$$

а текущее его значение n_{2r} — по той же, как и для n_{1r} , формуле.

Для определения следующего важного показателя рабочего процесса — коэффициента активного тепловыделения $\xi_{\text{акт}}$ — нужно знать приращение внутренней энергии ΔU и работу L расширения рабочего тела к рассматриваемому моменту времени (или углу поворота коленчатого вала).

Принято считать, хотя это и не вполне отвечает физической сущности явления, что в начале видимого сгорания (точка c) коэффициент $\xi_{\text{акт}}=0$, поэтому величины ΔU и L отсчитывают от $\varphi=\varphi_c$.

Приращение внутренней энергии (Дж) рабочего тела определяют по известной из термодинамики формуле

$$\Delta U=G'_c \int_{\varphi_c}^{\varphi} c_v (dT/d\varphi) d\varphi,$$

где c_v — удельная массовая теплоемкость.

Работами АН СССР показано, что при сгорании в двигателях ΔU можно определить наиболее точно, подставляя в расчетную фор-

мулу значение теплоемкости, соответствующее продуктам полного сгорания топлива. Это объясняется крайней неравномерностью и неопределенностью распределения температуры при сгорании по внутреннему объему цилиндра.

Зависимость теплоемкости [Дж/(кг·град)] продуктов сгорания от температуры хорошо описывается кривой второго порядка

$$c_V = c_0 + c_1 T + c_2 T^2.$$

С учетом этого обстоятельства уравнение для ΔU можно представить в следующем виде

$$\Delta U = G_{\text{ц}} \int_{\varphi_c}^{\varphi} (c_0 + c_1 T + c_2 T^2) (dT/d\varphi) d\varphi.$$

Значения коэффициентов c_0 , c_1 и c_2 для определения теплоемкости c_V продуктов сгорания бензина и дизельного топлива при разных α приведены в табл. XI.1.

Таблица XI.1

Топливо	α	c_0 , Дж/(кг·град)	c_1 , Дж/(кг·град ²)	$c_2 \cdot 10^4$, Дж/(кг·град ²)
Дизельное *	1,0	640,3	0,42	—0,88
	1,25	658,1	0,36	—0,70
	1,50	650,3	0,35	—0,68
	1,75	647,5	0,34	—0,66
	2,0	637,1	0,35	—0,73
Бензин **	0,8	650,4	0,43	—0,90
	0,9	655,5	0,41	—0,82
	1,0	658,6	0,40	—0,81
	1,1	647,6	0,40	—0,80
	1,2	647,6	0,39	—0,79

* Для температур 400+2600K

** Для температур 400+2700K

Работа расширения (Дж) рабочего тела к моменту φ

$$L = \int_{\varphi_c}^{\varphi} p (dV/d\varphi) d\varphi,$$

тогда активное тепло (Дж)

$$Q_{\text{акт}} = \Delta U + L,$$

и коэффициент активного тепловыделения

$$\xi_{\text{акт}} = Q_{\text{акт}} / (h_u G_{\text{т.ц}}),$$

где h_u — теплота сгорания топлива.

Результаты расчета машина выдает на бумажной ленте, на которой печатаются численные значения переменных величин:

$$dp/d\varphi; n_{1\text{т}}; n_{2\text{т}}; T; \Delta U; L; Q_{\text{акт}}; \xi_{\text{акт}},$$

а также исходного давления p через равные интервалы п. к. в. (например, через каждые 2°) в диапазоне от $\varphi = \varphi_a$ до $\varphi = \varphi_b$. Кроме того, машина печатает графики всех этих величин в функции φ в любом, заранее выбранном масштабе, а также выдает в печатном виде численные значения параметров, постоянных для исследуемого цикла: средних показателей политроп сжатия и расширения n_1 и n_2 и значение среднего индикаторного давления p_i . Весь процесс расчета по описанной методике продолжается менее двух минут.

Наиболее трудоемкой стадией работы при обработке индикаторных диаграмм является перевод диаграммы в таблицу для введения ее в ЭВМ. Эту работу, однако, можно механизировать с помощью различных электронных преобразователей или вообще упростить путем использования специальных устройств для прямого ввода графического материала в ЭВМ. Такие устройства выпускает отечественная промышленность серийно и они получают все большее распространение. Кроме того, при наличии соответствующей аппаратуры в ЭВМ можно вводить непосредственно сигнал, получаемый от электрического датчика давления, устанавливаемого в цилиндре индицируемого двигателя.

В результате обработки индикаторной диаграммы на ЭВМ можно получить достаточно подробные сведения о рабочем процессе испытуемого двигателя. В качестве примера на рис. XI.12 приведены результаты обработки на ЭВМ «Урал-3» индикаторной диаграммы двигателя ЗИЛ-130 (величины ΔU и L выражены в джоулях, а давление в барах; $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Н/м}^2$).

Предпосылки построения изложенной упрощенной методики и принятые ею допущения не снижают практически возможную точность исследования двигателей путем индицирования, поэтому методику можно применять как для учебных, так и в исследовательских целях, особенно при доводке новых и модернизируемых двигателей, когда проводят в основном сравнительные испытания.

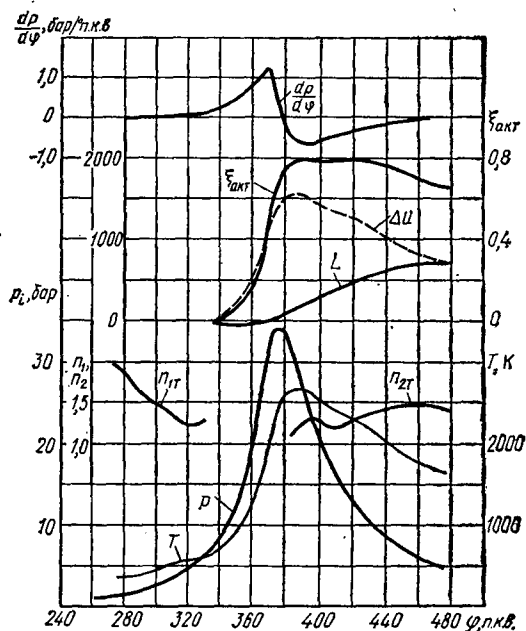


Рис. XI.12. Результаты обработки индикаторной диаграммы двигателя ЗИЛ-130 на ЭЦВМ «Урал-3»

ГЛАВА XII

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШУМА, ВИБРАЦИИ И ИЗНОСА ДВИГАТЕЛЕЙ

§ XII.1. Краткие сведения о шуме и вибрациях

Шум представляет собой сложный звук нестационарного характера, составляющие которого имеют различную частоту и интенсивность. Известно, что звук как физическое явление — это волновое колебание упругой среды, поэтому волны его возникают всегда, когда в такой среде имеется колеблющееся тело или когда частицы этой среды (газообразной, жидкой, твердой) совершают колебательные движения вследствие действия на них возмущающей силы. С точки зрения природы возникновения между звуками, шумом и вибрацией никакой разницы нет. Все они в основе своей складываются из гармонических колебаний. Разница состоит лишь в психофизиологическом восприятии их. Вибрация воспринимается осязанием, шум — слухом. Слуховое ощущение, возникающее у человека, вызывается звуком. Человек воспринимает звуковые раздражения в диапазоне частот $20 \div 20000$ Гц и способен выполнять тонкий анализ и синтез звуков, выбирать из большой массы полезные звуки и соответствующим образом реагировать на них. К звукам с частотой < 20 Гц — инфразвуки и > 20 кГц — ультразвуки человеческое ухо не чувствительно.

Шум оказывает отрицательное влияние на органы слуха человека и зрительно-двигательную координацию его, на проявление концентрированного и распределенного внимания, работу пищеварительного тракта и другие функции, важные для жизни и деятельности человека. При регулярном и продолжительном действии шума у людей возникают частые головные боли, гипертонические и склеротические явления, частичная потеря слуха и т. д. Поэтому в условиях современного развития моторизованных транспортных средств проблеме борьбы с шумом придают не меньшее значение, чем борьбе с загрязнением атмосферы токсичными веществами.

Вибрации принято характеризовать величинами колебательного перемещения, скоростью и ускорением. Вибрации также оказывают вредное действие на организм человека, особенно при частоте, близкой к частотам собственных колебаний отдельных органов человека, равных $6 \div 9$ Гц. Регулярные действия вибрации вызывают профессиональную вибрационную болезнь, опущение желудка, частичную потерю зрения и т. д. Опыт свидетельствует, что человек не

замечает вибраций с амплитудой перемещения 0,01 мм, при 0,1 м они не беспокоят его, а с возрастанием до 1,0 мм — неприятны.

Обычные производственные шумы возникают как следствие вибрации каких-либо поверхностей, причем с увеличением поверхностей и амплитуды их колебаний излучаемый шум усиливается. Исключение из этого составляют лишь аэродинамические шумы (вентиляторы, воздушные струи) и шумы, порождаемые трансформаторами, электрическими генераторами и двигателями.

Определяющими характеристиками источника колебаний являются частота f и интенсивность колебаний. Когда оценивают шум, то под интенсивностью подразумевают звуковое давление p , а в применении к оценке вибрации — амплитуды перемещения, скорости или ускорения колебательного процесса. Кроме того, звуковая волна характеризуется длиной λ и периодом T :

$$f = a/\lambda = 1/T,$$

где a — скорость распространения звукового колебания в исследуемой среде (скорость звука), которая для идеального газа при адиабатном процессе и плотности среды ρ будет $a = \sqrt{k(p/\rho)}$ (k — показатель адиабаты).

При исследовании вопросов излучения, отражения и распространения звука в разных средах важную роль играют акустическое сопротивление среды ρa и такая энергетическая его характеристика, как сила I звука.

Под силой звука понимают количество звуковой энергии, переносимое волной в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны. В случае плоской синусоидальной волны

$$I = p^2/(\rho a).$$

Для практических целей введено понятие уровня силы звука, выражаемого в логарифмических единицах — децибелах (дБ). А так как сила звука пропорциональна квадрату звукового давления [33, 40], то уровень силы звука определяют также через величины звукового давления

$$\beta = 10 \lg (I/I_0) = 20 \lg (p/p_0),$$

где I и p — измеряемые величины; I_0 — пороговое значение силы звука, равное 10^{-16} Вт/см²; p_0 — звуковое давление, условно принятое за порог чувствительности уха человека ($2 \cdot 10^{-6}$ кгс/м²).

При исследовании вибраций, кроме непосредственных значений амплитуд перемещения, скоростей и ускорений, измеряют также и уровень этих амплитуд (в децибелах) относительно условно принятых пороговых значений чувствительности, которые не зависят от частоты колебаний и составляют $5 \cdot 10^{-8}$ см/с. Пороговое значение амплитуд перемещений и ускорений на любой частоте

$$A_f = 2\pi f A_v = (2\pi f)^2 A_s,$$

где A_f , A_v и A_s — соответственно амплитуды виброускорения, вибро-скорости и виброперемещения.

Фактически на организм человека всегда действуют несколько источников колебаний с различными уровнями, энергию которых суммируют с учетом известного правила виброакустики [33, 40]. Согласно этому правилу борьбу за снижение шума следует начинать с подавления прежде всего частотных составляющих, имеющих наибольший уровень в исследуемом спектре. Подавление уровня меньшей составляющей практически не снижает уровня суммарного шума.

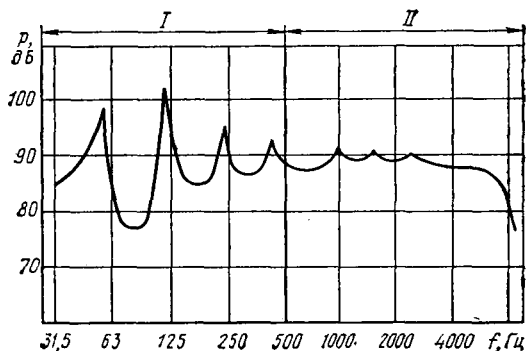


Рис. XII.1. Спектр шума автомобильного двигателя внутреннего сгорания:

I — зона дискретных частотных составляющих;
II — зона сплошного спектра

спектры — результат статистического сочетания большого количества случайных частотных составляющих (шумы ударного и взрывного происхождения). Смешанные спектры шумов наиболее распространены на практике и представляют собой сочетание дискретных составляющих и сплошного шумового фона.

Спектры шума двигателей внутреннего сгорания, как правило, смешанные (рис. XII.1). Основными источниками возникновения шума в карбюраторных двигателях и дизелях являются: системы впуска в цилиндры воздуха и выпуска отработавших газов; интенсивность нарастания давления в процессе сгорания рабочей смеси; удары поршней при перекладке; газораспределительный механизм; система охлаждения двигателя; приборы топливоподачи (в дизелях). Совокупные действия названных источников шума вызывают интенсивное акустическое излучение в окружающую среду и создают сложное звуковое поле около двигателя (рис. XII.2).

Анализ диаграммы шума, приведенной на рисунке, свидетель-

ствуются наличием в колебательном процессе синусоид с различными амплитудами, фазами и длинами волн, вследствие чего их делят на три вида: дискретные, или линейчатые, сплошные и смешанные. Дискретные спектры характеризуются наличием одной или нескольких частотных составляющих с высшими для них гармониками (например, спектры шума машин с вращающимися частями). Сплошные

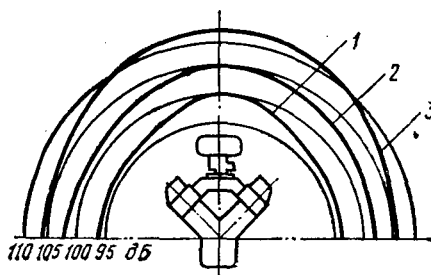


Рис. XII.2. Шумовые диаграммы двигателя ЗИЛ-130 на режимах при открытии дросселя:

1 — полном $n=1000$ об/мин; 2 — на 25%
и $n=3200$ об/мин; 3 — полном $n=3200$ об/мин

ствуется, что излучение шума резко изменяется при изменении режима работы двигателя, а разница в уровне шума на одном и том же режиме составляет 5—6 дБ, причем максимум шума возникает в зоне воздухоочистителя системы впуска воздуха в цилиндры.

§ XII.2. Приборы и методы измерения шума и вибрации двигателей

Спектры шумов исследуют с помощью так называемых объективных шумомеров, состоящих из датчика (микрофона или акселерометра), воспринимающего звуковое давление или вибрацию, измерительного звена, выполняемого в виде лампового усилителя и называемого обычно шумомером, или виброметром, и выходного звена — указателя, проградуированного в дБ.

Микрофоны применяют с достаточно широким рабочим частотным диапазоном, с высокой и стабильной чувствительностью и возможно меньшими размерами. При внесении в звуковое поле они не должны его искажать. Обычно используют конденсаторные, электродинамические, пьезоэлектрические и керамические микрофоны. Лучшими из них считают конденсаторные и пьезоэлектрические. Так, конденсаторные микрофоны фирмы «Брюль и Кьер» (Дания) типов 4145, 4133, 4136 и 4138 позволяют измерять звуки с частотами $2 \div 18\,000$; $5 \div 40\,000$; $8 \div 70\,000$ и $30 \div 140\,000$ Гц и соответственно в динамическом диапазоне $10 \div 146$; $32 \div 160$; $70 \div 180$ и $76 \div 184$ дБ.

Вибродатчики (вибропреобразователи) в зависимости от назначения позволяют измерять как относительные, так и абсолютные параметры колебательных процессов (перемещения, скорости, ускорения). Для определения, например, виброизоляции применяют датчики относительных перемещений, а энергию колебаний источника оценивают датчиками скорости или ускорения. В настоящее время исключительное распространение получили датчики ускорения, а другие параметры вибрации определяют с помощью специальных интеграторов, позволяющих преобразовывать ускорения в нужные выходные параметры. Обычно используют емкостные, индуктивные, тензорезисторные и пьезоэлектрические датчики. Последние наиболее распространены, поскольку они обладают высокой чувствительностью и широким диапазоном измеряемых частот.

Известные датчики типа Д10 завода «Виброприбор» (г. Таганрог) имеют, например, чувствительность 28 мВ/г, диапазон частот $1 \div 20\,000$ Гц и массу 30 г, а наибольшие ускорения для них составляют 1000 г; датчики фирмы «Брюль и Кьер» типа 4330 и 4336 обладают соответственно чувствительностью $35 \div 70$ и $4 \div 6$ мВ/г; диапазонами частот $5 \div 10\,000$ и $0 \div 40\,000$ Гц, имеют массу 33 и 2 г и рассчитаны на ускорения 500 и 1400 г.

Шумомеры и виброметры являются измерительным звеном в рассматриваемых устройствах. Основаны они на использовании транзисторных и иных усилителей, имеющих характеристики для трех определенных значений частот, позволяющих измерять уровень громкости чистых тонов в диапазонах: 25—55 фон — характеристика А,

55—85 фон — *B* и от 85 фон — *C*. Характеристика *C* имеет прямолинейный участок и дает уровень звукового давления в децибелах.

Общий вид полупроводникового шумомера и его характеристик показан на рис. XII.3. Результаты измерений такими шумомерами предопределяются частотными составляющими шума. Если уровень исследуемого шума предопределяется составляющими в полосе частот $800 \div 4000$ Гц, то показания прибора на всех трех частотных

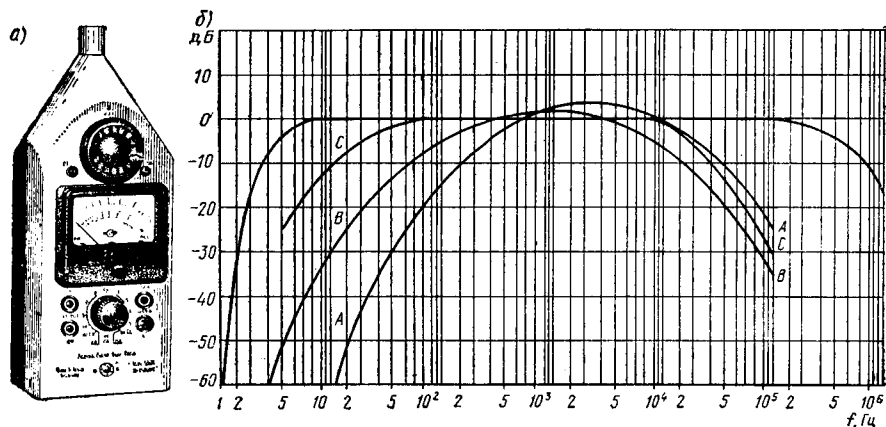


Рис. XII.3. Полупроводниковый прецизионный шумомер типа 2203 фирмы «Брюль и Кьер» (а) и его частотные характеристики (б)

характеристиках должны быть примерно одинаковы. А в случаях, когда доминирующие составляющие находятся в зонах частот ниже 800 и выше 4000 Гц, показания шумомера при использовании характеристики *C* оказываются выше, чем с характеристиками *B* и тем более *A* из-за уменьшения при этом коэффициента усиления в области низких и высоких частот.

В современных шумомерах предусматривают еще линейную характеристику, обеспечивающую линейность коэффициента усиления прибора в диапазоне частот от 2—10 до 20—40 кГц (рис. XII.3, б). Линейные характеристики имеют также шумомеры типа 1409 фирмы ДОУ (Англия), типа PSI 201 фирмы РФТ (ГДР) и др.

Шумомеры с линейной характеристикой используют и в качестве виброметров, для которых необходима именно линейная характеристика в широком частотном диапазоне.

Кроме указанных шумомеров и виброметров, для исследования шума и вибраций применяют многоканальные усилители-анализаторы, позволяющие одновременно получать необходимые характеристики исследуемых процессов в различных точках испытуемого объекта. Это особенно важно при оценке звукоизоляции, определении направлений распространения шума и вибраций при исследовании случайных процессов и особенно неустановившихся режимов работы двигателей.

Анализаторы шума подразделяют на фильтровые и гетеродинные. Фильтровые состоят из набора электрических фильтров, каждый из которых пропускает определенную полосу частот. Например, октавных, полу-, треть-, четвертьоктавных и т. д.

Когда спектр виброакустического процесса получают способом последовательного переключения фильтров, анализ называют *последовательным*. Если же фильтры включают одновременно, то такой способ анализа называют *параллельным*. Преимущество последнего заключается в том, что с меньшей затратой времени удается наблюдать изменение частотных составляющих для всего исследуемого процесса.

В гетеродинных анализаторах получение определенной полосы пропускания обеспечивают с помощью узкополосных кварцевых фильтров. Разрешающая способность гетеродинных анализаторов достигает $1 \div 2$ Гц. Однако эти особенности полностью можно использовать только в исследованиях так называемых тональных шумов и вибраций, когда анализатор позволяет весьма детально изучать частотный состав процесса. При исследовании неустановившихся или случайных процессов применение гетеродинных анализаторов не всегда возможно.

Таким образом, при выборе аппаратуры следует учитывать особенности спектра исследуемого сигнала. Различают следующие типовые виды сложных сигналов: периодические сложной формы, имеющие спектр из ряда дискретных частотных составляющих; случайные стационарные, содержащие широкий набор частотных составляющих со случайными амплитудами и фазами; сумму периодических и случайных сигналов (шумы и вибрации, создаваемые двигателями внутреннего сгорания в условиях эксплуатации); нестационарные (процессы однократного действия, изменяющиеся во времени).

В зависимости от цели исследования определяют необходимую полосу пропускания фильтра. Например, в случаях выявления источника шума или вибрации целесообразно применять анализ с постоянной полосой пропускания, ширина которой определяется характером спектра. При стационарных периодических процессах выбирают узкую полосу фильтра, а для случайных процессов — более широкую. При работах по шумоглушению и виброгашению и сравнительной оценке виброакустических процессов целесообразен анализ с постоянной относительной полосой пропускания, несмотря на то, что с повышением частоты разрешающая способность фильтров снижается.

Для записи результатов анализа виброакустических сигналов применяют фотоприставки к осциллоскопам, осциллографы, быстродействующие самописцы уровней и магнитофоны для технических измерений (магнитографы). Наиболее широко применяют самописцы уровней типов И-110 (СССР), 2305 фирмы «Брюль и Кьер», 1460 фирмы «ДООУ» и др.

В последнее время широко используют также запись шума на магнитную ленту. Такие записи легко и многократно можно воспроизводить и регистрировать любым из приведенных выше способов, не повторяя заново эксперимента. Магнитные записи особенно удобны

при исследовании нестационарных, кратковременных и однократных процессов, при работе в полевых условиях. Однако магнитограф должен иметь устройства для ступенчатой регулировки уровня записи и воспроизведения, калибратор для контрольной записи на каждой ленте и прибор для индикации уровня записи и воспроизведения. Для этой цели пригодны магнитофоны «Яуза-10» (СССР), 7001 фирмы «Брюль и Кьер» и др. Более подробные сведения о приборах и способах использования их приведены в специальной литературе [40] и ГОСТ 11870—66 «Машины. Шумовые характеристики и методы их определения».

Для выявления доли звучания отдельных источников в общем шумообразовании двигателя обычно применяют метод последовательного исключения источников шума при одновременном измерении частотных спектров. Благодаря этому удается оценивать как количественные, так и качественные акустические особенности источников шума. Результаты обследования этим методом карбюраторного двигателя ЗИЛ-130 и дизеля ЯМЗ-236 приведены в табл. XII.1 [40].

Таблица XII.1

Источники шума	ЯМЗ-236		ЗИЛ-130	
	Уровень шума, дБ	Область частот, Гц	Уровень шума, дБ	Область частот, Гц
Общий уровень шума двигателя	110—112	20—8000	103—105	20—8000
Система впуска:				
с воздухоочистителем . . .	108—110	200—500	102—104	250—800
без воздухоочистителя . .	112—122	200—1000	114—116	250—1000
Выпуск (с глушителем) . . .	88—90	100—1000	88—90	150—1000
Процесс сгорания	120	—	110	—
Клапанный механизм	90	400—5000	90	400—5000
Вентилятор охлаждения . . .	100—104	250—600	100—104	300—800
Топливный насос	104—108	500—3000	—	—
Шум от вибрации наружных поверхностей двигателя	105	1000—5000	100—102	1000—5000

§ XII.3. Изучение износа двигателей

Конечная цель изучения характерных особенностей износа автомобильных и тракторных двигателей заключается в повышении их моторесурса, имеющем большое народнохозяйственное значение. Известно, что с точки зрения быстроты изнашивания детали и узлы двигателя не равноценны. Наибольшему износу подвержены детали цилиндрико-поршневой группы и трущиеся пары шейки — вкладыши подшипников коленчатого вала, а также клапан — седло клапана [15, 16, 51]. Особенно сложной является проблема увеличения срока службы трущихся пар цилиндрико-поршневой группы вследствие комплексного действия на них различных быстротекущих физических и

химических процессов, стимулирующих или непосредственно разрушающих поверхности трения.

По характеру вызываемых разрушений износ принято разделять на три основных вида: эрозивный, абразивный и коррозионный. Абразивное изнашивание связывают в основном с проникновением в двигатель твердых частичек из окружающей среды, тогда как другие виды износа обуславливаются процессами в самом двигателе и не всегда могут быть четко разграничены. Так, многочисленные разновидности эрозии возникают вследствие механического истирания, схватывания и других разрушительных процессов при непосредственном контакте трущихся поверхностей. Коррозионный износ — следствие окислительных процессов на поверхностях трения в результате действия на них химической (газовой) или электрохимической (кислотной) коррозии. Так как газовая коррозия проявляется при высоких температурах, а кислотная — в случаях переохлаждения двигателя, то вероятность корродирования, например, стенок цилиндров всегда возможна, особенно в зонах, не защищенных маслом.

Однако корродирование как вид износа нельзя рассматривать в отрыве от механического истирания и других процессов, разрушающих поверхности трения. Снятие окисной пленки со стенок и механическое истирание их протекают, например, одновременно как заключительный этап механизма коррозионного изнашивания. Очевидно, при наличии абразивных частиц на рабочих поверхностях разрушение окисной пленки и сдирание ее со стенок вместе с неокисленным металлом интенсифицируется еще в большей мере. Известно, что абразивные частицы попадают в двигатель не только вместе с воздухом и топливом, но могут накапливаться также на поверхностях трения в виде продуктов коррозии и эрозии, если последние не выносятся с маслом. Поэтому абразивный износ деталей двигателя в какой-то мере всегда возможен как в карбюраторных двигателях, так и в дизелях.

Тем не менее все аспекты изнашивания нельзя объяснить только действием абразива. Так, характерную пикообразность эпюр износа стенок цилиндров карбюраторных двигателей, связанную с непосредственным действием на их стенки потока горючей смеси, нередко истолковывают как следствие чисто абразивного износа, не учитывая того, что поток вносит в цилиндры и частицы жидкого топлива. Ударяясь о стенки, они разжижают и смывают с них масляную пленку, вследствие чего интенсивность местного износа от всех возможных при этом видов эрозии и коррозии возрастает. В случаях плохой очистки воздуха в цилиндры попадает еще и дорожная пыль, а проникновение большого количества ее в цилиндры катастрофично для их стенок и двигателя в целом.

Следует, однако, учитывать, что современные автомобильные и тракторные двигатели хорошо защищены от проникновения в них особенно опасных абразивных частиц, и средства такой защиты от внешней среды непрерывно совершенствуются, тогда как сводить до минимума неизбежную эрозию и возможную коррозию стенок цилиндров весьма сложно и практически не всегда удается.

Метод исследования износа и длительность испытаний выбирают с учетом ожидаемой интенсивности изнашивания, наличия материальных средств, аппаратуры, времени и т. д.

Существующие методы определения износа по их принципиальным особенностям можно разделить на две группы:

а) методы, позволяющие одновременно с определением величины износа выявлять распределение ее по поверхности трения, т. е. определять геометрическую форму изношенной детали. К таким относятся: непосредственный обмер (микрометраж) деталей, измерение лунок на обследуемых поверхностях и профилографирование;

б) методы, позволяющие определять только количественную потерю металла с трущихся поверхностей деталей. К таким относятся: взвешивание деталей, определение износа по концентрации продуктов износа в масле или вводимых радиоактивных изотопов.

Методы определения износа подразделяют также на: требующие полной разборки двигателя для выполнения измерений, частичной разборки и не требующих разборки. Если возможно, то предпочтение отдают методам, не связанным с разборкой двигателя. Разборка и сборка нарушают установившееся взаиморасположение между трущимися парами, поэтому возникает необходимость в некоторой приработке их после сборки, что осложняет проведение испытаний.

Микрометраж деталей с целью определения их износа основан на измерении одних и тех же размеров деталей до и после испытаний. ГОСТы точно определяют методику измерений всех основных деталей двигателя и порядок оформления микрометражных карт. Кроме необходимости разборки двигателя, метод очень трудоемок, причем целесообразен только в случае проведения длительных испытаний, когда износ достигает больших величин и погрешности измерения становятся приемлемыми.

Метод лунок, или искусственных баз, состоит в выстрагивании на поверхностях трения ромбовидных углублений с помощью алмазного резца. Измеряя посредством микроскопа размеры лунок (длина большой диагонали которых составляет около 1,5 мм) перед испытаниями и по их окончании определяют величину местного износа. По серии измеренных лунок определяют величину износа и геометрическую форму изношенной детали. Метод искусственных баз отличается высокой точностью и значительно сокращает продолжительность испытаний по сравнению с обычным микрометражем. Для нарезания и измерений лунок используют прибор типа УПИ-6. Расчеты результатов измерений описаны в литературе [55].

Взвешивание применяют для определения износа мелких деталей (поршневые кольца, вкладыши) параллельно с их микрометражем с полной разборкой двигателя.

Определение износа по концентрации продуктов износа в масле двигателя не требует его разборки и может быть выполнено по способу «железо в масле» или с применением спектрального анализа.

По «железу в масле» учитывают накопление в картерном масле двигателя только частиц черных металлов, снимаемых в результате износа со стенок цилиндров, поршневых колец, шеек валов и других

деталей. Способ основан на предположении, что частицы, смытые маслом с поверхностей трения, тонко диспергированы и находятся в масле во взвешенном состоянии, а концентрация их возрастает пропорционально износу двигателя.

Точность данного метода во многом зависит от анализа пробы на содержание железа, поэтому на практике применяют полярографы, обладающие высокой чувствительностью. Например, обнаруживают железо при концентрации менее 0,01 мг в 1 г масла. «Железо в масле» применяют как экспресс-метод, который позволяет проводить испытания за один рабочий день без разборки двигателя. Однако возможности его ограничены тем, что он позволяет оценивать только суммарный износ стальных и чугунных деталей.

Спектральный анализ обладает тем свойством, что позволяет определять в масле наличие всех металлов, применяемых в машиностроении [36]. Зная, например, характерный для данной детали легирующий элемент, можно проследить именно ее износ без какой-либо предварительной к этому подготовки.

Радиоактивные изотопы в применении к изучению износа двигателей позволяют непрерывно регистрировать наблюдения в ходе испытаний. Для этой цели тем или иным способом активируют исследуемую деталь, а в процессе работы радиоактивные частицы вместе с остальными продуктами износа попадают в масло, где концентрацию их обнаруживают с помощью счетчиков Гейгера. Применение радиоактивных изотопов детально рассмотрено в литературе [36].

Чтобы резко сократить затраты времени на износные испытания двигателей, принимают или более чувствительный метод обнаружения износа, или же прибегают к методу так называемых ускоренных испытаний [16, 41]. В настоящее время ускоренные испытания применяют особенно широко, основывая их на подаче в цилиндры и картер двигателя абразива из расчета создания неблагоприятных условий работы [15, 16].

ГЛАВА XIII

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ

§ XIII.1. Общие сведения

Технико-экономические и другие показатели работы двигателей внутреннего сгорания, как правило, оценивают по характеристикам, получаемым при стендовых испытаниях.

Характеристикой называют графическое изображение зависимости одного или нескольких показателей работы двигателя от показателя, принятого за основу.

Классификация характеристик определяется назначением и показателями, положенными в основу их получения. Различают, например, типовые, специальные и другие характеристики.

К типовым обычно относят: скоростные, нагрузочные, регуляторные, внутренних потерь и холостого хода. Такие характеристики снимают в соответствии с ГОСТами при нормальном тепловом состоянии двигателя и с регулировками приборов питания и зажигания, рекомендованными заводом-изготовителем.

При специальных испытаниях снимают регулировочные характеристики по расходу топлива и углу опережения зажигания в карбюраторных двигателях, определяют индикаторные показатели, тепловой баланс двигателя, теплонапряженность его деталей, химический состав, а также токсичность отработавших и картерных газов и т. д.

Учитывая, что новый ГОСТ 18509—73 на тракторные дизели детально регламентирует методику определения ряда вспомогательных характеристик, отсылаем читателей к указанному ГОСТу для ознакомления с характеристиками устойчивости и равномерности работы тракторных дизелей, производительности вентилятора и насоса системы охлаждения, пуска дизелей, расхода масла на угар и др.

§ XIII.2. Скоростные характеристики

Характеристики этого вида представляют собой графическое изображение закономерности изменения обследуемых параметров двигателя от числа оборотов (скорости вращения) его вала. Основными из них являются внешняя и частичные скоростные характеристики, характеристики холостого хода и условных внутренних потерь.

Внешней скоростной называют характеристику, получаемую при полном открытии дроссельной заслонки (заслонок в многокамерных карбюраторах) в карбюраторных двигателях или при крайнем предельном положении рычага управления рейкой насоса высокого давления, соответствующем полной подаче топлива в дизелях. Действующие ГОСТы рекомендуют принимать предельное положение рычага управления насосом по инструкции завода-изготовителя.

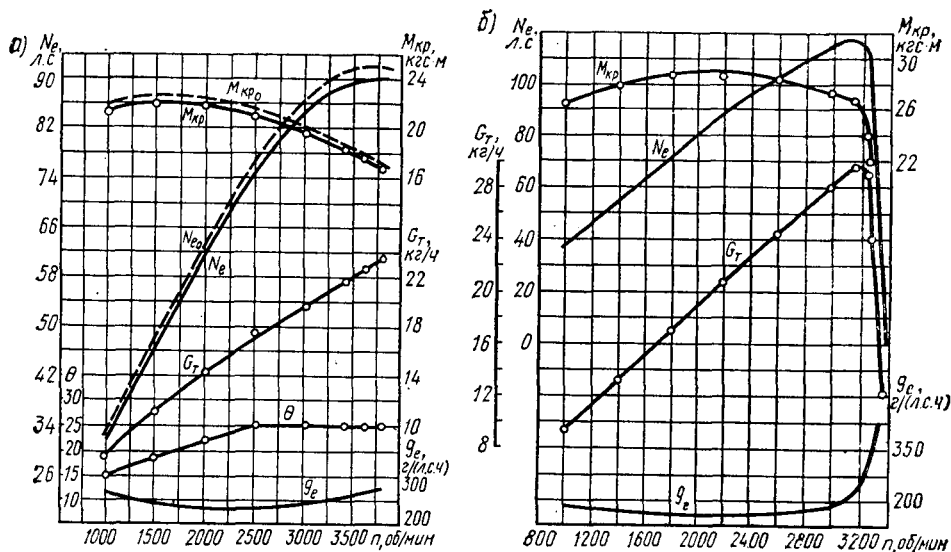


Рис. XIII.1. Внешние скоростные характеристики:

а — карбюраторного двигателя (без регуляторной ветви); б — дизеля (с регуляторной ветвью)

Строго говоря, понятие внешней скоростной характеристики предполагает получение предельно возможных энергетических показателей двигателя. Для дизелей такие показатели, как известно, лежат за пределом дымления, когда коэффициент избытка воздуха $\alpha \rightarrow 1,0$. Однако с регулировкой насоса высокого давления на такую подачу топлива работать нельзя из-за обильного дымления и опасности выхода двигателя из строя вследствие повышенного нагарообразования в камере сгорания. Трудно на всех скоростных режимах обеспечивать также работу дизеля на пределе дымления. Поэтому крайнее положение рейки насоса, устанавливаемое заводом-изготовителем для полной подачи топлива, следует принимать как рациональный предел такой подачи. Следовательно, рассматриваемую скоростную характеристику в применении к дизелям можно лишь условно считать внешней.

С некоторыми оговорками этот термин применим и к двигателям с искровым зажиганием, поскольку упомянутая характеристика не является такой, именно внешней характеристикой, ниже которой располагаются все другие скоростные характеристики. Дело в том,

что предельно высокие энергетические показатели данного двигателя с искровым зажиганием можно получить только при оптимальных составах смеси и наивыгоднейших моментах подачи искры в цилиндры, а существующие автоматы регулирования подачи искры, как правило, не обеспечивают этого в широком диапазоне скоростных режимов.

Типичные внешние скоростные характеристики двигателей с искровым зажиганием и дизелей показаны на рис. XIII.1, а, б. Прежде всего они позволяют оценивать энергетические и экономические

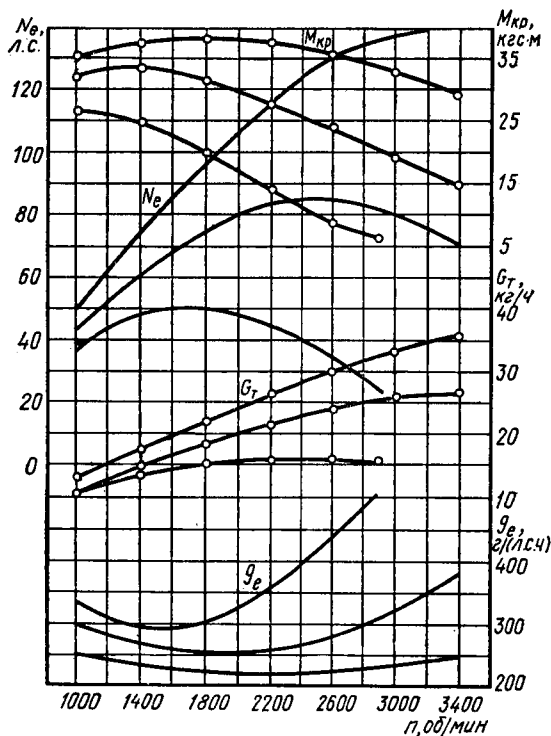


Рис. XIII.2. Частичные и внешняя скоростные характеристики

показатели двигателя, определяют минимально устойчивые числа оборотов (n_{min}) и числа оборотов вала, соответствующие максимальным величинам мощности и крутящего момента, минимальному удельному расходу топлива, а также дают представление о закономерности изменения других его оценочных параметров при заводской регулировке приборов питания и зажигания.

Кроме графического изображения мощности, крутящего момента, часового и удельного расходов топлива, характеристику дополняют иногда графиками угла опережения зажигания или подачи топлива,

разрежения в заданной зоне впускного тракта, температуры смеси или газа, расхода воздуха, состава смеси и т. д.

Согласно действующим ГОСТам, внешнюю скоростную характеристику снимают в диапазоне чисел оборотов вала $n_{\min} \div 1,1 n_{\text{ном}}$ для двигателей с искровым зажиганием, работающих без ограничителя (рис. XIII.1, а), и $n_{\min} \div n_{\max}$ для дизелей (рис. XIII.1, б). При наличии регулятора (или ограничителя) числа оборотов вала двигателя внешняя характеристика позволяет также определять момент включения регулятора (ограничителя) и судить о степени неравномерности работы последнего.

Снятие внешней скоростной характеристики заключается в следующем. При прогревом работающем двигателе увеличивают подачу горючей смеси (при внешнем смесеобразовании) или топлива (при внутреннем смесеобразовании) и одновременно нагружают его с помощью тормозного устройства так, чтобы на режиме полной подачи вал двигателя развивал минимальное устойчивое число оборотов ($n_{\min}$). После необходимого корректирования теплового состояния двигателя и выдержки его на стабильном режиме работы не менее 5 мин снимают требуемые показатели, т. е. производят замеры нужных параметров. Далее нагрузку постепенно снимают, добиваясь возрастания скорости вращения вала двигателя на 250 или 500 об/мин, и по выходе на установившийся режим работы снова делают замеры и т. д., пока обороты вала не достигнут указанных ранее пределов.

Для выявления более достоверной закономерности протекания внешней характеристики замеры повторяют, последовательно нагружая двигатель и уменьшая число оборотов его вала до $n_{\min}$.

Минимальное число оборотов вала двигателя при полной нагрузке, т. е. в случае работы по внешней скоростной характеристике, определяют путем торможения двигателя до наступления заметного колебания числа оборотов его вала, после чего нагрузку уменьшают до получения устойчивой работы в течение 10 мин.

При снятии внешней скоростной характеристики следует учитывать, что получаемые эффективные показатели определенным образом зависят от состояния окружающей среды (давления, температуры и влажности воздуха). Поэтому сравнивать между собой данные различных испытаний и характеристики отдельных двигателей можно только после приведения результатов к стандартным атмосферным условиям (см. далее). Исправленные показатели $M_{\text{кpo}}$ и N_{eo} называют *приведенными* (на рис. XIII.1, а они нанесены штриховыми линиями).

Частичной скоростной называют характеристику, получаемую при некоторых промежуточных положениях дроссельной заслонки (заслонок), постоянных для каждой характеристики, или неизменном промежуточном положении рычага управления, соответствующем неполной подаче топлива насосом высокого давления в дизелях.

Особенности протекания частичных скоростных характеристик поршневых двигателей можно проследить по графикам, представленным на рис. XIII.2. Так же, как и внешние скоростные, эти характеристики позволяют оценивать основные параметры двигателей, но в случае работы с частичными нагрузками.

Метод получения частичных скоростных характеристик в принципе не отличается от определения внешней характеристики двигателя. Разница состоит лишь в выборе любого фиксированного положения для дроссельной заслонки или рейки насоса, отличного от полного их открытия или предельного перемещения.

Характеристика холостого хода представляет собой графическое изображение часового расхода топлива при работе двигателя без нагрузки. Для карбюраторных двигателей ее часто изображают также

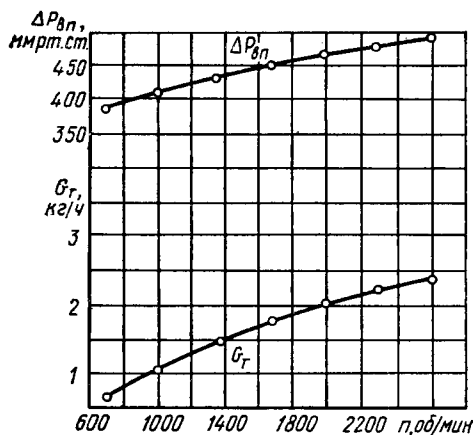


Рис. XIII.3. Характеристики холостого хода

в виде графика разрежения $\Delta P_{вп}$ в задротельном пространстве впускного тракта.

При снятии характеристики холостого хода тормоз отсоединяют и путем выбора положения для дроссельной заслонки или рейки насоса изменяют число оборотов вала прогретого двигателя от минимальных устойчивых до числа оборотов, равного $0,5 n_{ном}$, соблюдая установленную регулировку приборов питания и зажигания.

Для тракторных дизелей характеристику снимают от n_{max} холостого хода до минимально устойчивого числа

оборотов вала (колебания не должны превышать $\pm 5\%$).

Типичная характеристика холостого хода двигателя показана на рис. XIII.3. От стабильности протекания этой характеристики в значительной степени зависит токсичность двигателя.

Минимальное число оборотов холостого хода двигателя определяют путем постепенного прикрытия дроссельной заслонки или уменьшения подачи топлива (в дизелях) до наступления неустойчивого вращения коленчатого вала, после чего число оборотов вала увеличивают до получения устойчивой работы двигателя в течение 10 мин.

Характеристика внутренних (механических) потерь в двигателе представляет собой графическое изображение мощности, затрачиваемой на преодоление трения в его механизмах и на привод вспомогательного оборудования при изменении числа оборотов. Такая характеристика должна выявлять мощность, затрачиваемую на преодоление трения и на приведение в действие механизмов и агрегатов, обслуживающих двигатель в эксплуатации, за исключением вентилятора и глушителя шума отработавших газов, а также оборудования, предназначенного для обслуживания шасси (компрессора, насоса гидросилителя руля и т. п.). В мощность механических потерь условно включают также мощность, затрачиваемую на газообмен в двигателе — насосные потери.

Характеристику механических потерь снимают методом прокручивания вала испытуемого двигателя с помощью балансирующей электрической машины, работающей в моторном режиме, в диапазоне чисел оборотов $n_{\min} \div n_{\text{ном}}$ (или $n_{\max}$ для дизелей) при отключенной подаче топлива. Чтобы обеспечить одинаковое нормальное тепловое состояние двигателя в процессе снятия характеристики, в промежутках между замерами его прогревают под полной нагрузкой (10 мин).

Кроме мощности механических потерь $N_{\text{м.п}}$ на рассматриваемую характеристику наносят графики условного среднего давления механических потерь $p_{\text{м.п}}$ и механического к. п. д. двигателя $\eta_{\text{м}}$ (рис. XIII.4). Условное среднее давление (кгс/см²) представляет собой разность между суммой условных средних индикаторных давлений всех цилиндров и средним эффективным давлением двигателя. Величину его подсчитывают по формуле

$$p_{\text{м.п}} = (225\tau k / V_{\text{л}}) P = aP,$$

где $a = (225\tau k / V_{\text{л}})$ — коэффициент, постоянный для данного двигателя; $\tau = 4 - 2$ — коэффициент тактности соответственно для четырех- и двухтактных двигателей; k — постоянная тормоза; $V_{\text{л}}$ — литраж двигателя, л; P — показания динамометра тормозной установки, кгс.

Величину механического к. п. д. находят из соотношения между мощностями эффективной N_e и механических потерь $N_{\text{м.п}}$

$$\eta_{\text{м}} = N_e / (N_e + N_{\text{м.п}}).$$

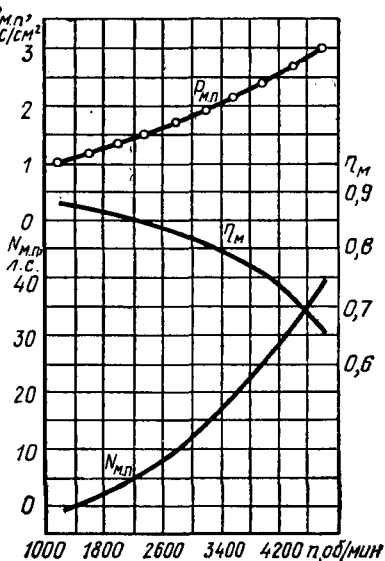


Рис. XIII.4. Характеристика внутренних потерь и механического к. п. д. двигателя

ГОСТы на испытания двигателей допускают также определение механических потерь методом выключения цилиндров. Двигатель при этом обследуют на полной нагрузке и числе оборотов вала, соответствующем $M_{\text{кр. max}}$, с чередованием работы его на всех цилиндрах при последовательном выключении каждого из них. Перед выключением очередного цилиндра двигатель должен проработать на всех включенных цилиндрах до восстановления принятого теплового состояния (температур масла и воды), а после отключения цилиндра уменьшением нагрузки восстановить снижающуюся при этом скорость вращения вала до заданной. Колебания чисел оборотов относительно принятых не должны превышать $\pm 1\%$.

Методом выключения цилиндров определяют одновременно и равномерность их работы, которую оценивают коэффициентом равномерности

$$\Delta = N_{i \min} / N_{i \max},$$

где $N_{i \min}$ и $N_{i \max}$ — соответственно наименьшее и наибольшее значения условной индикаторной цилиндровой мощности, л. с.

Изложенные методы, являясь наиболее простыми, не дают, однако, точного представления о величине механических потерь, так как погрешность их достигает $\pm 30\%$ и более. Они могут быть поэтому рекомендованы лишь для типовых испытаний двигателей.

В исследовательской практике для определения величины механических потерь применяют обычно прямое индицирование цилиндров двигателя. Определив этим методом механический к. п. д. $\eta_m = N_e / N_i$, можно найти мощность механических потерь $N_{м. п} = (1 - \eta_m) N_i$ с ошибкой, не превышающей $\pm 5\%$ [58].

Применение данного метода ограничивается чисто техническими трудностями, связанными с необходимостью индицирования всех цилиндров двигателя. Поэтому в последнее время величину механических потерь все чаще определяют методом так называемого двойного выбега, не требующего громоздкого оборудования. Для этого снимают тахограммы вращения коленчатого вала двигателя, которое он совершает после отключения подачи топлива или выключения зажигания за счет запаса кинетической энергии его движущихся деталей (первый выбег) и совместно с известным дополнительным моментом инерции (второй выбег). Точность метода не уступает точности прямого индицирования [58].

§ XIII.3. Нагрузочные характеристики

Характеристики, выявляющие закономерность изменения ряда параметров двигателя в зависимости от изменения нагрузки при заданном постоянном числе оборотов вала, называют *нагрузочными*.

При снятии нагрузочных характеристик двигатель прогревают до нормального теплового состояния, выводят его на заданный скоростной режим и постепенно увеличивают открытие дросселя в двигателях с внешним смесеобразованием или перемещают рейку топливного насоса в дизелях от положения, соответствующего холостому ходу на данном скоростном режиме, до полного их открытия или предельного положения, сохраняя заданный скоростной режим путем нагружения (разгружения) двигателя с помощью тормоза. В качестве независимого переменного параметра ГОСТы рекомендуют в этом случае принимать мощность, развиваемую двигателем. Однако независимыми переменными могут служить среднее эффективное давление p_e , показание динамометра тормоза P , часовой расход воздуха G_v , относительное открытие дросселя или перемещение рейки насоса (в дизелях) и другие параметры, характеризующие загрузенность двигателя. Для двигателей с искровым зажиганием удельным

параметром является, например, давление во впускном трубопроводе $p_{вп}$, пропорционально которому изменяется наполнение цилиндров.

Типичные нагрузочные характеристики показаны на рис. XIII.5, а, б. Обычно они представляют собой графики часового G_r и удельного g_e расходов топлива, характеризующих изменение этих параметров по одному из указанных выше независимому переменному. При необходимости характеристику дополняют графиками разрежения $\Delta p_{вп}$,

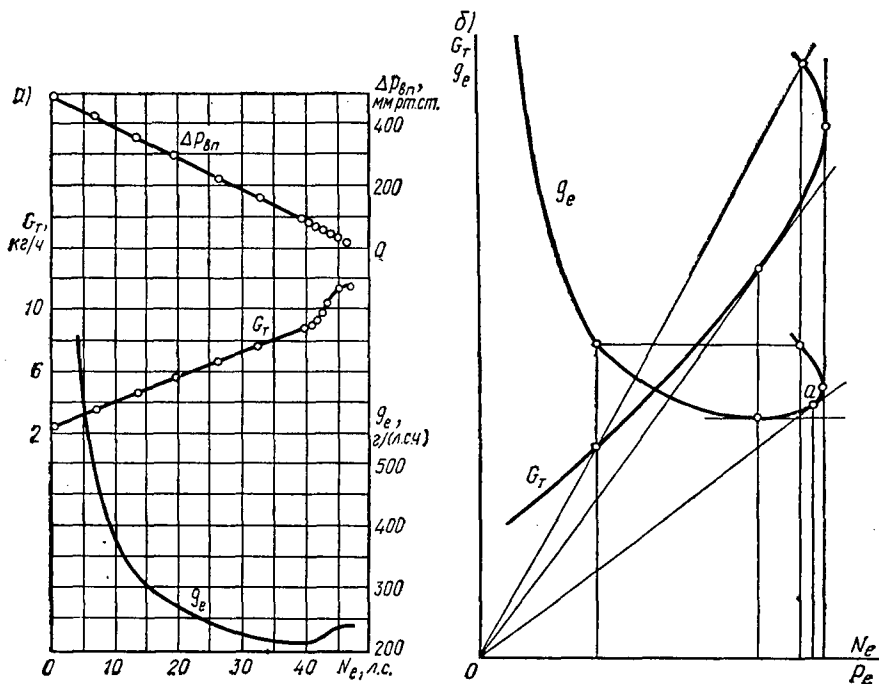


Рис. XIII.5. Нагрузочная характеристика:

а — карбюраторного двигателя; б — дизеля

возникающего во впускном трубопроводе, коэффициента избытка воздуха α , угла опережения зажигания θ^0 и другими параметрами.

Нагрузочные характеристики, снятые для ряда чисел оборотов вала, позволяют судить о закономерности часового расхода топлива по мере увеличения нагрузки, выявляют минимальные удельные расходы топлива, момент включения экономайзера в карбюраторных двигателях и величину максимальной мощности на этих скоростных режимах. Кроме того, представляется возможным определять начало видимого дымления дизелей (точка а на рис. XIII.5, б), строить регулировочные характеристики по давлениям впуска и выпуска (ГОСТ 18509—73).

Наглядность графического изображения характерных параметров двигателя несколько утрачивается, когда приходится иметь дело с большой серией характеристик. Поэтому с целью устранения этого

недостатка целесообразно строить многопараметровые характеристики (рис. XIII.6).

Многопараметровые, или универсальные, характеристики в общем случае строят в координатах x и y по результатам обработки серии исходных характеристик, выявляющих зависимость исследуемого параметра z от переменного x при различных постоянных значениях y . Поскольку каждая точка многопараметровой характеристики соответствует лишь одной паре значений x и y , ей можно приписать

определенное значение z , взятое из вспомогательных характеристик. Многопараметровая характеристика, получающаяся тогда соединением точек, имеющих одинаковые значения z , наглядно показывает характер изменения и величину z при любых возможных значениях x и y .

На рис. XIII.6 многопараметровая характеристика обобщает серию нагрузочных, снятых на нескольких скоростных режимах двигателя. Линии удельного расхода топлива g_e , нанесенные на характеристику, дают полное пред-

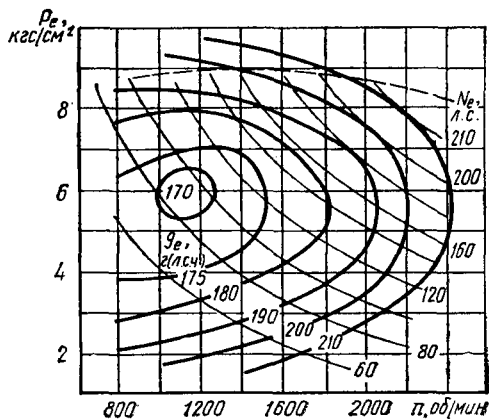


Рис. XIII.6. Многопараметровая характеристика дизеля

ставление об экономичности двигателя во всем диапазоне его возможных скоростей и нагрузок и выявляют зону режимов наибольшей экономичности.

На многопараметровую характеристику наносят также линии постоянных значений дополнительных показателей. Такими в рассматриваемом случае являются графики мощности и начала видимого дымления (последний показан штриховой линией и определяет предельно допустимые значения p_e).

Регуляторные характеристики снимают по ГОСТ 18509—73 при скоростном режиме, соответствующем $M_{кр\ max}$, и постоянном положении органа управления регулятором путем постепенного увеличения нагрузки от холостого хода до полной (рис. XIII.7). Если регулятор установлен на частичную подачу топлива, то получают частичные регуляторные характеристики.

Регуляторная характеристика выявляет зависимость числа оборотов вала двигателя от развиваемой им мощности при неизменном положении рычага управления регулятором. На характеристику наносят также графики часового G_n и удельного g_e расходов топлива. По данным этой характеристики определяют степень неравномерности регулятора

$$\delta = (n_{x.\ max} - n_p) / n_{cp},$$

где n_p — число оборотов двигателя, соответствующее началу действия регулятора; $n_{x. \times \max}$ — максимальное число оборотов холостого хода двигателя, допускаемое регулятором; $n_{cp} = (n_p + n_{x. \times \max})/2$.

§ XIII.4. Регулировочные характеристики

— Выбор регулировок систем питания и зажигания двигателей, обеспечивающих длительную работу их в тяжелых условиях без перегрева и детонации, проводят, как правило, экспериментальным путем, методом снятия характеристик, называемых *регулировочными*. В основу таких характеристик обычно положен расход топлива и

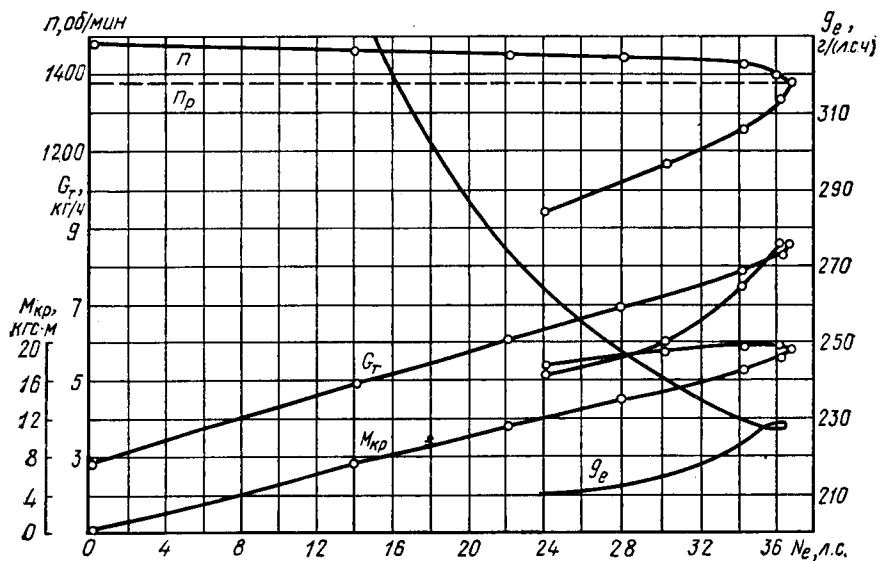


Рис. XIII.7. Регуляторная характеристика дизеля

угол опережения зажигания или момент подачи топлива в цилиндры, а также расход воздуха при неизменной нагрузке или пропорциональное расходу воздуха давление в определенной зоне впускного тракта, например, в диффузоре или в задрессельном пространстве. Как будет далее показано, предпочтительнее последнее. Характеристики позволяют выявлять составы рабочей смеси и оптимальные моменты ее воспламенения, при которых на заданном режиме наиболее полно можно использовать тепло, вносимое топливом в цилиндры, или обеспечить получение возможно большей литровой мощности.

Независимо от способа подачи топлива в цилиндры регулировочные характеристики снимают при доводке новых двигателей и аппаратуры питания, а также в целях уточнения регулировок, изучения распределения смеси по цилиндрам и т. д.

Регулировочные характеристики по расходу топлива (или по составу смеси) представляют собой графическое изображение зависимости эффективной мощности N_e и эффективного удельного расхода топлива g_e от расхода топлива G_T (коэффициента избытка воздуха α) при постоянных числах оборотов n вала двигателя, положении дроссельной заслонки (заслонок), температурах нагрева масла и охлаждающей жидкости и наивыгоднейшем угле опережения зажигания или угле подачи топлива в цилиндры.

На рис. XIII.8 приведена типичная для карбюраторного двигателя регулировочная характеристика по расходу топлива и указаны приемы графической ее обработки.

Снятие регулировочной характеристики по расходу топлива заключается в следующем. Двигатель прогревают и выводят на

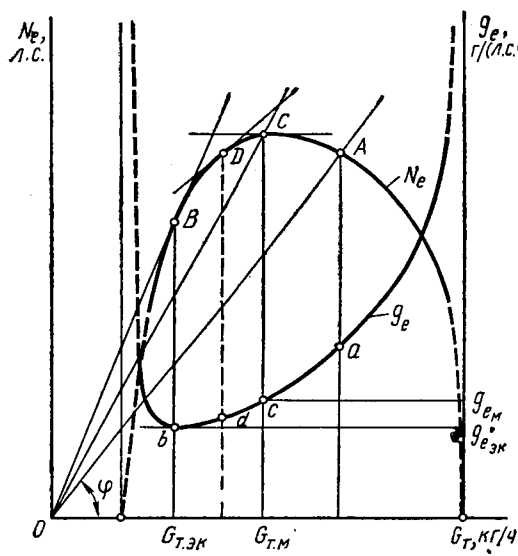


Рис. XIII.8. Регулировочная характеристика по расходу топлива

скоростной режим с заданным числом n оборотов вала, которое сохраняют постоянным на всем возможном при этом диапазоне изменения мощности N_e . С этой целью постепенно увеличивают открытие дроссельной заслонки до нужной величины и одновременно с помощью тормоза повышают нагрузку так, чтобы обеспечить принятое $n = \text{const}$. Снятие характеристики можно начинать как с переобедненных, так и с переобогащенных составов горючей смеси. Для повышения достоверности результатов последовательно используют и тот и другой варианты. Рассмотрим более трудный из них.

Путем изменения проходного сечения дозирующего отверстия в топливном жиклере с помощью регулировочной иглы или изменением давления в поплавковой камере или же другим возможным способом уменьшают подачу топлива до появления хлопков и выброса пламени в карбюратор из-за переобеднения горючей смеси. После этого несколько обогащают смесь до установления сравнительно стабильной работы двигателя без хлопков в карбюратор. Так как вследствие обеднения смеси обороты вала и мощность двигателя резко снижаются, то его одновременно разгружают и добиваются сохранения заданного $n = \text{const}$ при θ_n — наивыгоднейшем угле опережения подачи искры, т. е. угле подачи, соответствующем наибольшей величине показаний весового устройства тормоза с данной регулировкой.

С установленным расходом топлива двигатель выдерживают на принятом режиме до выравнивания его теплового состояния и после окончательной корректировки числа оборотов вала и угла опережения подачи искры проводят замеры нужных параметров.

После окончания замеров увеличивают несколько подачу топлива и снова делают замеры, соблюдая описанные выше условия. В принципе подачу топлива можно наращивать до тех пор, пока дальнейшее увеличение его расхода вновь не приведет к неустойчивой работе двигателя вследствие переобогащения горючей смеси. Однако из-за повышенного нагарообразования в камерах сгорания при работе двигателя на переобогащенных смесях снятие характеристики ограничивают лишь выявлением максимума мощности, что вполне обеспечивается, если после возможной точки перегиба характеристики сделать два-три замера.

Возможный диапазон расхода топлива G_T , как известно, ограничен пределами воспламеняемости горючей смеси. В теоретическом случае при достижении расходом топлива этих пределов $N_e=0$ (рис. XIII.8), а в зоне близких к ним значений G_T двигатель работает неустойчиво. При изменении расхода топлива в зоне между двумя неустойчивыми рабочими состояниями двигателя величина N_e возрастает до максимума на данных скоростном и нагрузочном режимах и потом вновь снижается, причем резко, если расход топлива уменьшается от его значения G_T , соответствующего указанному максимуму мощности.

Так как эффективный удельный расход топлива [г/(л. с.·ч)]

$$g_e = (G_T/N_e) 1000,$$

то график удельного расхода протекает иначе — величина g_e возрастает до бесконечности при крайних значениях расхода топлива G_T , как показано штриховыми линиями на рисунке. В общем случае g_e изменяется пропорционально $\operatorname{ctg} \varphi$, где φ — угол, заключенный между осью абсцисс и лучом, выходящим из начала координат O . На рисунке лучи OA и OC пересекают кривую N_e , а луч OB лишь касается ее. Поэтому образуемый им угол φ — наибольший, а значение $\operatorname{ctg} \varphi$ — наименьшее. Следовательно, из отмеченных точками a, b, c, d величин на графике g_e минимальной является величина, обозначенная точкой b . Соответствующие этому расходы топлива считают экономичными и обозначают $g_{e\text{ эк}}$ и $G_{T\text{ эк}}$.

Регулировку на максимальную мощность $N_{e\text{ max}}$ находят построением касательной линии к кривой N_e , проводимую параллельно оси абсцисс (точка C на графике). Перпендикуляр, опущенный из точки C на ось абсцисс и пересекающий кривую g_e в точке c , и определяет $g_{e\text{ м}}$ и $G_{T\text{ м}}$, т. е. удельный и часовой расходы топлива, соответствующие максимальной мощности. Вполне очевидно, что регулировки на максимальную мощность и максимальную экономичность не могут совпадать, поскольку $g_{e\text{ min}}$ всегда соответствует мощности, меньшей мощности в точке C , и, следовательно, наблюдаются при меньшем часовом расходе топлива G_T .

В практике, однако, карбюраторы не регулируют на получение $g_{\text{ек}}$ и $g_{\text{ем}}$. Это и понятно, так как малейшее нарушение регулировки легко может сместить ее, например, в сторону больших удельных расходов неустойчивой зоны работы двигателя. Поэтому главную дозирующую систему карбюраторов настраивают на расходы, несколько превышающие расходы $G_{\text{т. эк}}$. Для нахождения этих расходов используют один из способов, известных под названием двух касательных и треугольника.

Способ двух касательных состоит в том, что из начала координат проводят касательную линию к левой ветви графика N_e (луч OB на рис. XIII.8) и касательную линию к этому графику, параллельную оси абсцисс, т. е. линию, проходящую через точку C . Перпендикуляр, опущенный из точки пересечения этих двух касательных на ось абсцисс, и определяет часовой расход топлива, на который регулируют карбюратор. Однако этот способ требует громоздких построений в связи с необходимостью нанесения на график начала координат с нулевыми значениями мощности и расхода топлива.

Способ треугольника рациональнее и состоит в проведении одной касательной линии к левой ветви графика N_e с тангенсом угла, равным $1 \text{ л. с.}/(\text{кг/ч})$ (точка D на рис. XIII.8). Перпендикуляр, опущенный из этой точки на ось абсцисс (показан штриховой линией), определяет часовой расход топлива, на который предпочтительнее регулировать карбюратор. Чтобы точнее найти нужный угол наклона касательной, на формате графика строят вспомогательный треугольник с катетами, параллельными осям координат. При этом число единиц расхода топлива и мощности принимают численно одинаковыми, учитывая масштабы построения характеристики. Гипотенуза такого треугольника и определяет направление искомой касательной линии.

Иногда регулировки, соответствующие минимуму удельного расхода, называют *оптимальными*, но в действительности оптимальными их можно называть лишь условно, поскольку они вовсе не гарантируют получение минимальных суммарных расходов топлива во всех возможных условиях работы в эксплуатации. В понятие оптимальности обычно вкладывают более широкий смысл в связи с общей экономической целесообразностью мероприятия.

При снятии регулировочных характеристик по расходу топлива технико-экономические показатели двигателя во многом предопределяются величинами η_v — коэффициента наполнения и η_m — механического к. п. д. Действительно, в неизменных условиях окружающей среды при работе на заданном топливе величины, определяющие состояние атмосферы, в частности, ρ_v — плотность воздуха, и род топлива, а именно, h_u — низшую теплоту сгорания и l_0 — теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания одного килограмма топлива, можно отнести к численному коэффициенту A . Тогда, пренебрегая также парами топлива вследствие малой их доли в горючей смеси, получим следующее выражение мощности:

$$N_e = p_e V_{\pi} n / (225\tau) = A (\eta_v / \alpha) \eta_v \eta_m n,$$

где p_e — среднее эффективное давление; V_d — литраж двигателя; η_i — индикаторный к. п. д.; $\alpha = G_b / (G_{t0})$ — коэффициент избытка воздуха; τ — коэффициент тактности двигателя.

Вполне очевидно, что по мере прикрытия дроссельной заслонки расход воздуха G_b , а следовательно, и величина коэффициента наполнения η_v уменьшаются. Вследствие этого неизбежно снижается мощность, развиваемая двигателем, а в случае одинакового расхода топлива обогащается также горючая смесь. В результате значения величин $G_{т.м}$ и $G_{т.эк}$ смещаются в сторону меньших расходов топлива. Одновременно возрастают величины g_e , поскольку удельный расход определяется соотношением

$$g_e = 632 / [\eta_i h_n (1 - N_{м.п} / N_i)].$$

При $n = \text{const}$ мощность механических потерь $N_{м.п}$ с прикрытием дроссельной заслонки практически сохраняет свою величину, а индикаторная мощность N_i уменьшается пропорционально уменьшению наполнения цилиндров, т. е. пропорционально величине коэффициента η_v .

Регулировочные характеристики по расходу топлива, снятые с двигателя МЗМА-408 при разных положениях дросселя, подтверждают это (рис. XIII.9). Чтобы получить данные для построения таких характеристик по составу смеси, к испытуемому двигателю подсоединяют соответствующую аппаратуру измерения расхода воздуха, включая ресивер и систему трубопроводов (см. гл. VIII), что вносит иногда искажения в получаемые результаты. Поэтому устройства для измерения расхода воздуха следует подключать только по мере необходимости.

Регулировочные характеристики при неизменной нагрузке, или постоянной мощности двигателя, выражают расход топлива G_t в функции расхода воздуха G_b или давления $p_{вп}$ во впускном тракте.

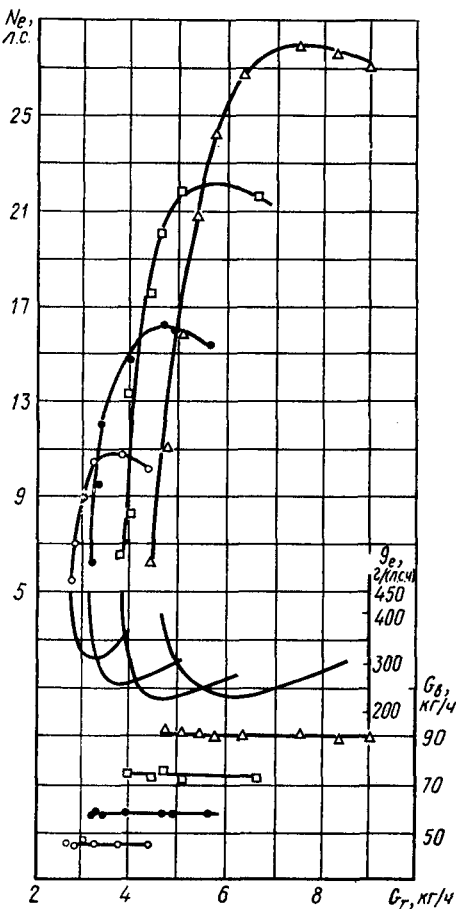


Рис. XIII.9. Регулировочные характеристики по расходу топлива двигателя МЗМА-408, снятые при $n=2500$ об/мин и различных давлениях $p_{вп}$ (мм рт. ст.) во впускном трубопроводе:

○ — 400; ● — 500; □ — 600; △ — 700

Положение дроссельной заслонки в этом случае не фиксируют, а выбирают в зависимости от расхода топлива таким образом, чтобы сохранить $N_e = \text{const}$ при $n = \text{const}$. В результате изменяются G_v и $p_{вп}$.

Снятие регулировочной характеристики при $N_e = \text{const}$ сводится к следующему. Испытуемый двигатель прогревают и выводят на заданный скоростной режим работы. Потом постепенно открывают дроссельную заслонку и одновременно притормаживают двигатель

до желаемой степени нагруженности при наивыгоднейшем угле опережения зажигания θ_n .

Изменяют состав смеси, несколько обогащая ее против обычной регулировки, а изменившийся режим работы восстанавливают с помощью дроссельной заслонки. После необходимой выдержки, выравнивания теплового состояния двигателя и корректировки угла опережения зажигания производят нужные замеры. Далее, постепенно обедняя горючую смесь, переходят к следующему замеру, соблюдая изложенную выше последовательность, пока не наступает явно неустойчивая работа двигателя вследствие

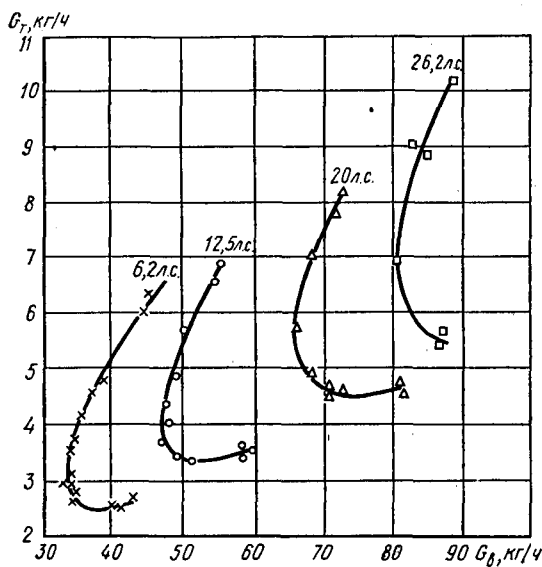


Рис. XIII.10. Регулировочные характеристики, снятые при постоянной мощности, развиваемой двигателем МЗМА-408 на режиме $n = 2500$ об/мин

переобогащения горючей смеси. Корректировать нагрузку тормозом не требуется, если последний обладает достаточно стабильной характеристикой. Опыт показывает, что данные характеристики целесообразно снимать, начиная с обогащенных горючих смесей, поскольку на переобогащенных смесях при одновременном изменении расхода топлива и воздуха труднее бывает устанавливать нужный режим работы.

Вполне очевидно, что удельный расход топлива при $N_e = \text{const}$ изменяется прямо пропорционально его часовому расходу, поэтому для оценки технико-экономических показателей двигателя достаточно построить всего один график часового расхода топлива в зависимости от изменения расхода воздуха (рис. XIII.10) или, в крайнем случае, определить эту зависимость от $p_{вп}$, т. е. от величины давления во впускном трубопроводе, выражаемом в мм рт. ст. Иногда график часового расхода строят в зависимости от разрежения во впускном трубопроводе ($\Delta p_{вп}$ мм рт. ст.) или по составу смеси, т. е. по коэффициенту α . Однако оба параметра в данном случае мало подходят для этой цели. По величинам разрежений трудно сопоставлять

результаты отдельных испытаний, а в случае использования α на характеристику приходится наносить еще график расхода воздуха, если возникает необходимость выявить мощностной состав горючей смеси. Последнее обуславливается тем, что графики расхода топлива и воздуха имеют при этом по одному перегибу. На графике расхода топлива перегиб определяет экономичные, а на графике расхода воздуха — мощностные составы горючей смеси. Тогда как характеристика, построенная в координатах $G_T = f(G_B)$, совершенно четко (см. рис. XIII.10) позволяет выявлять $G_{T.m}$ и $G_{T.эк}$ без нанесения на характеристику дополнительного графика расхода воздуха.

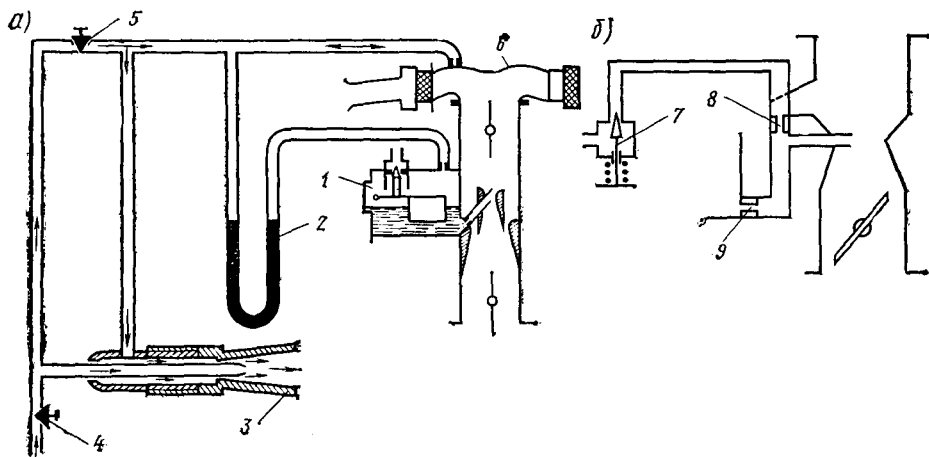


Рис. XIII.11. Устройства для регулирования расхода топлива одно- и многокамерными карбюраторами:

а — со струйным насосом; б — иглой на входе в воздушный жиклер главной дозирующей системы карбюратора

Для определения расходов топлива, соответствующих максимальной мощности и наибольшей экономичности, по графику (см. рис. XIII.10) в первом случае достаточно восстановить перпендикуляр к оси абсцисс так, чтобы он был касателен к кривой G_T , а во втором — касательная к кривой G_T должна быть перпендикулярна к оси ординат. Легко видеть, что для принятой нагрузки на заданном скоростном режиме меньшему расходу воздуха отвечает $G_{T.m}$ и соответственно α_m , а большей величине расхода — $G_{T.эк}$ и, стало быть, $\alpha_{эк}$. Следовательно, регулировочная характеристика в координатах $G_T = f(G_B)$ выявляет как обычные топливные оценочные параметры двигателя, так и полноту использования рабочего тела (воздуха) в его цилиндрах в связи с особенностями приготовления горючей смеси или другими факторами.

Регулировочные характеристики, снятые при $N_e = \text{const}$, позволяют в одних и тех же координатах строить графики для большинства частичных нагрузок, включая и холостой ход. Однако этим способом нельзя обследовать режимы полных нагрузок и нагрузок, близких к полным, поскольку возможность манипуляции дроссельной заслон-

кой отсутствует или весьма ограничена. По этой причине на графиках (рис. XIII.10) при $N_e=26,2$ л.с. не выявлена величина $G_{т. эк}$.

Следовательно, регулировочные характеристики при полных и близких к ним нагрузках можно снимать только по способу с фиксированным положением дроссельных заслонок, т. е. определять зависимость $N_e=f(G_t)$ при $n=\text{const}$.

Для дистанционного управления расходом топлива при снятии регулировочных характеристик широко применяют устройства, основанные на способе изменения давления над поверхностью топлива в поплавковой камере карбюратора. На рис. XIII.11, а показано устройство, рассчитанное на использование сжатого воздуха с давлением до 4—5 кгс/см². Через кран 4 воздух подают к струйному насосу 3, а через игольчатый клапан 5 подводят к пьезометру 2 и фильтру 6. Изменяя положение клапана 5, устанавливают пьезометр на нулевую отметку, что свидетельствует о равенстве давлений в полостях 1 поплавковой камеры карбюратора и 6 — воздушного фильтра двигателя, или же создают нужный перепад давлений с целью уменьшения (увеличения) расхода топлива из поплавковой камеры. Недостатком такого устройства, разработанного на Заволжском моторном заводе, как и аналогичных ему, является необходимость полной герметизации поплавковой камеры карбюратора.

На рис. XIII.11, б представлено устройство, применяемое для указанных целей в лаборатории двигателей МАМИ и требующее герметизации только зоны ввода воздуха в воздушный жиклер 8 главной дозирующей системы карбюратора. Разрежение у топливного жиклера 9 регулируют при этом иглой 7, причем жиклер предвительно расщепляют.

Регулировочные характеристики по зажиганию представляют собой графическое изображение зависимости эффективной мощности N_e и удельного g_e расходов топлива от момента подачи электрической искры в цилиндры двигателя при работе на заданном скоростном режиме и неизменном расходе воздуха.

Такие характеристики обычно снимают с целью выявить наилучшие моменты зажигания рабочей смеси в цилиндрах нормально прогретого двигателя, при которых с наибольшей полнотой можно использовать тепло, получаемое вследствие сгорания топлива на различных нагрузочных и скоростных режимах работы. Так, согласно теории двигателя и опыта желательно, чтобы в любом случае давление в цилиндре достигало своего максимума вблизи в. м. т., точнее через 10—15° после завершения такта сжатия, когда поршень движется уже к н. м. т., совершая ход расширения. Отклонение от этого в ту или другую сторону приводит к определенному, а в известных условиях к резкому ухудшению технико-экономических показателей двигателя. Поэтому правильный выбор так называемого угла опережения зажигания имеет большое практическое значение.

Углы опережения (запаздывания) зажигания θ отсчитывают в градусах угла поворота коленчатого вала двигателя от момента проскакивания электрической искры между электродами свечи зажигания до в. м. т. Отсчеты делают с помощью устройств, позволяющих

визуально или иным способом фиксировать момент проскакивания искры. Если искру подают раньше прихода поршня в в. м. т., считают угол положительным и называют *углом опережения*; если позже в. м. т. — отрицательным и называют *углом запаздывания*. Влияние углов опережения и запаздывания зажигания на протекание рабочего цикла в двигателях детально изучают в курсе теории [37]. Поэтому далее рассматриваются лишь методы снятия характеристики и закономерности изменения величин мощности и расхода топлива в зависимости от угла θ .

Типичная характеристика по зажиганию, снятая с двигателя МЗМА-408 на режиме полной нагрузки при $n=3000$ об/мин, показана на рис. XIII.12. Наибольшую мощность на данном режиме двигатель развивает, как мы видим, только с одним, вполне определенным углом опережения подачи искры в цилиндры. Уменьшение угла θ , а равно и увеличение его, приводят к значительному снижению мощности. А поскольку часовой расход топлива G_T при неизменных оборотах вала и положении дроссельных заслонок постоянен (см. рис. XIII.12), то величины удельного расхода топлива изменяются обратно пропорционально изменению мощности. Поэтому максимум мощности и минимум удельного расхода топлива в данном случае всегда наблюдаются при одинаковом угле подачи искры в цилиндры или, как говорят, совпадают. Соответствующий этому вполне определенный угол опережения называют *наивыгоднейшим* для принятого режима и обозначают θ_n .

Работать с углом $>\theta_n$ нецелесообразно не только из-за ухудшения показателей, но также вследствие возникновения детонации, разрушающей механизмы двигателя. Практика показывает, что раннее появление детонации не всегда позволяет настраивать систему зажигания на наивыгоднейшие углы подачи искры в цилиндры без перехода на более качественное топливо. Для решения этой проблемы обычно снимают серию характеристик по зажиганию, прежде всего на больших и полных нагрузках и различных скоростных режимах, поскольку значения θ_n изменяются по нагрузке и по оборотам вала. Значение θ_n возрастает, как известно, с уменьшением нагрузки и увеличением числа оборотов вала.

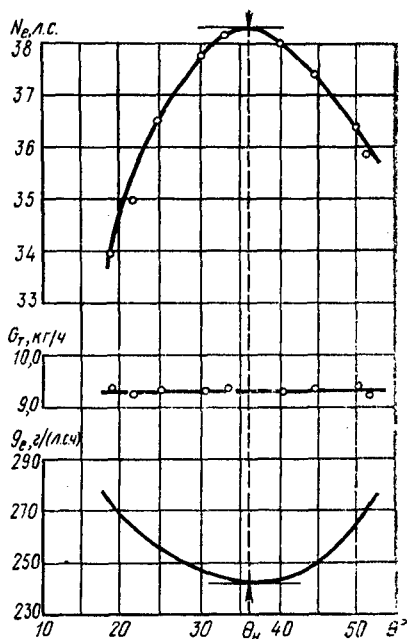


Рис. XIII. 12. Регулировочная характеристика по зажиганию двигателя МЗМА-408, снятая при 100%-ном открытии дроссельных заслонок и $n=3000$ об/мин

Снятие характеристики по зажиганию сводится к следующему. Двигатель, оснащенный устройством, позволяющим изменять и фиксировать момент подачи искры, прогревают до нормального теплового состояния. Далее, путем одновременного открытия дроссельной заслонки и регулирования нагрузки с помощью тормоза, выводят на заданный режим испытаний. Потом уменьшают угол опережения подачи искры до наступления заметного падения мощности двигателя,

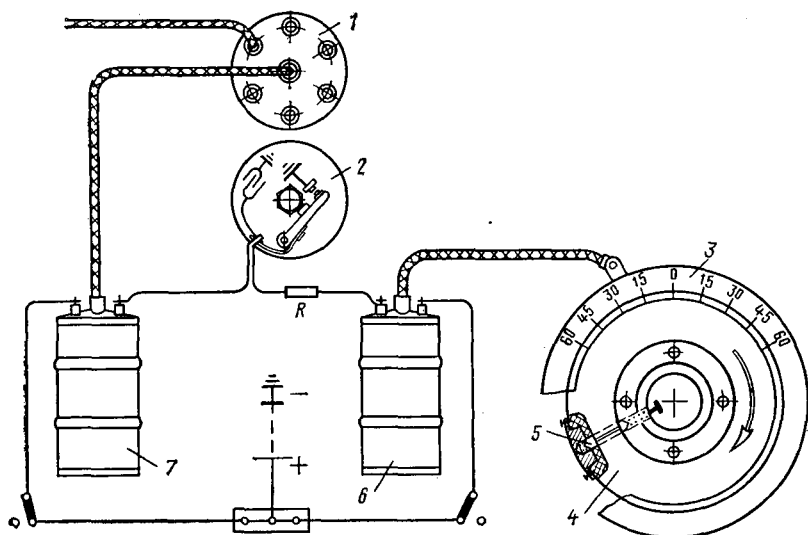


Рис. XIII.13. Простейшее устройство для определения момента подачи электрической искры в цилиндры двигателя

что вызывает также неизбежное снижение числа оборотов коленчатого вала. Чтобы восстановить принятый скоростной режим работы, двигатель соответственно разгружают и после необходимого корректирования теплового состояния делают нужные замеры, включая угол, определяющий момент подачи искры в цилиндры. Затем на $3\text{--}5^\circ$ увеличивают значение угла θ и снова выходят на заданный режим, строго соблюдая одинаковость условий последующих замеров, пока вновь не наступает заметное падение мощности из-за слишком раннего зажигания смеси в цилиндре.

Устройство для определения угла подачи искры в простейшем исполнении показано на рис. XIII.13. Текстолитовый диск 4 с вмонтированной в него неоновой лампочкой 5 закрепляют на носке коленчатого вала. Впереди диска 4 с зазором не более 1 мм устанавливают на кронштейнах тонкий металлический отсчетный диск 3, изолированный от массы, с нанесенной на него шкалой в градусах угла поворота коленчатого вала. Нулевая отметка шкалы при нахождении поршня первого цилиндра в в. м. т. должна точно совпадать с положением неоновой лампочки, а точнее с прорезью в текстолитовом диске, через которую наблюдают вспышку лампочки в момент про-

скакивания искры. Если момент подачи искры совпадает с в.м.т., то вспышка лампочки происходит на нулевой отметке. Поэтому отклонение вспышки от нулевой отметки свидетельствует о запаздывании или опережении момента зажигания смеси в цилиндрах двигателя.

Электрическая искра высокого напряжения подается на диск 3 от дополнительной катушки 6 зажигания, которую параллельно основной катушке 7 включают в цепь низкого напряжения через

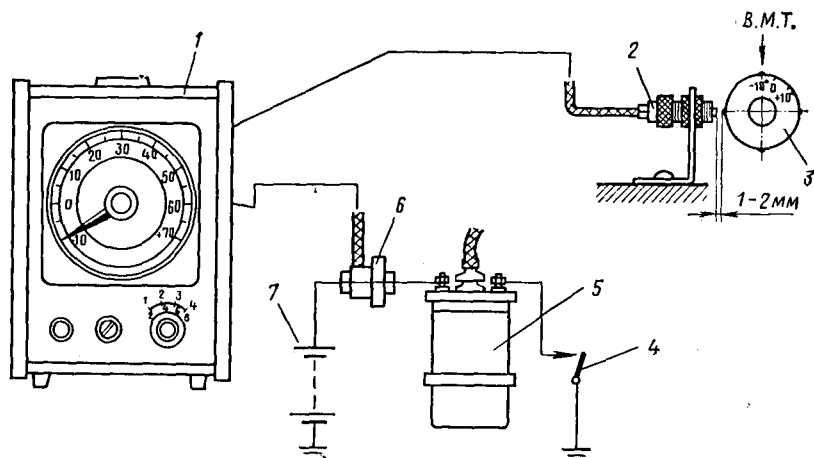


Рис. XIII 14. Электронный стрелочный прибор для определения момента зажигания:

1 — стрелочный указатель прибора; 2 — датчик опорных сигналов; 3 — диск, установленный на носок коленчатого вала; 4 — выключатель; 5 — катушка зажигания; 6 — датчик сигналов искрообразования; 7 — аккумулятор

общий для них прерыватель 2. Благодаря этому обеспечивается полная синхронность работы катушек. Вследствие размыкания контактов прерывателя ток высокого напряжения, возникающий во вторичной обмотке катушек, от основной идет на распределитель 1, а от дополнительной — на диск 3, проскакивает в виде искры на обкладку лампы 5 и далее через массу и аккумулятор возвращается в обмотки катушки. В момент появления искры в зазоре между дисками 3 и 4 неоновая безынерционная лампа 5, оказавшись в поле напряжения, дает вспышку, которая позволяет определять момент подачи искры в цилиндры по шкале 3.

Чтобы не перегружать прерыватель и не вносить помех в работу системы зажигания двигателя, в сеть низкого напряжения дополнительной катушки следует вводить сопротивление R и включать ее только на время замера угла подачи искры в цилиндры.

В настоящее время для регистрации момента зажигания созданы электронные устройства, позволяющие вести дистанционное наблюдение за опережением или запаздыванием подачи искры в цилиндры с помощью стрелочного указателя, размещаемого на пульте управления. Действие таких устройств основано на применении триггерных схем, обеспечивающих фиксацию рассогласования между двумя

электрическими импульсами, которые поступают в электронный измерительный прибор от двух источников: отметчика в.м.т. и датчика, регистрирующего сигналы зажигания, т. е. искрообразование.

Общая компоновка стрелочного прибора АМ-16, выпускаемого японской фирмой «Оно-сюкки» для определения θ° , показана на рис. XIII.14. Прибор обеспечивает показания с точностью примерно 1,5% в диапазоне углов $-10 \div +70^\circ$ поворота коленчатого вала и

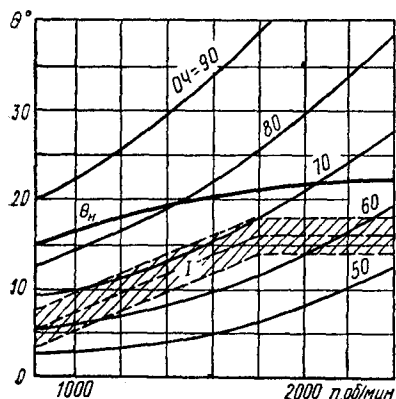


Рис. XIII.15. Первичная детонационная характеристика двигателя

и скорости вращения $300 \div 10\,000$ об/мин независимо от числа цилиндров и тактности двигателя.

Для определения момента подачи искры в цилиндры двигателей успешно используют также электрические стробоскопы (см. гл. V), которые обладают тем преимуществом, что не оказывают влияния на характеристику источника воспламенения рабочей смеси.

Регулировочные характеристики по зажиганию служат исходными для выявления антидетонационных качеств карбюраторных двигателей и оценки антидетонационных свойств бензинов.

Детонационные характеристики двигателей определяют по ГОСТ 10373—63 при доводке новых и модернизации существующих конструкций. Для выполнения работ берут не менее трех обкатанных двигателей, отвечающих утвержденным техническим условиям, с приборами зажигания и питания, настроенными по крайним и среднему пределам принятых для них допусков. Испытательный стенд должен обеспечивать работу двигателя не менее чем на четырех различных топливах при изменениях угла опережения зажигания $-20 \div +70^\circ$ поворота коленчатого вала с точностью отсчета до 1° .

Характеристики по зажиганию снимают на полной нагрузке и четырех скоростных режимах, включая минимальные и номинальные числа оборотов вала, при работе на эталонных смесях, имеющих различные ОЧ, строго соблюдая регламент, установленный ГОСТом. По результатам испытаний строят графики $N_e = f(\theta^\circ)$, как показано на рис. XIII.12, по которым и определяют так называемые *первичные детонационные характеристики*, представляющие собой зависимость углов опережения зажигания, соответствующих началу детонации, т. е. возникновению характерного стука, от числа оборотов вала для нескольких эталонных топлив (рис. XIII.15). На полученную серию кривых накладывают график оптимальных значений угла опережения зажигания θ_n или поле 1 характеристики автомата опережения зажигания и по общим точкам исследуемых графических зависимостей строят *результатирующую детонационную характеристику* (ГОСТ 10373—63 и [31]).

Чтобы повысить точность обнаружения детонационных стуков, используют пьезокварцевые и другие датчики, которые устанавливают на головку блока цилиндров двигателя и подключают их к катодному осциллографу. Наблюдение за его экраном позволяет выделять детонационные стуки из общего фона шумов в виде резких колебаний (всплесков) светового луча.

§ XIII.5. Сопоставление результатов испытаний

Материалы, получаемые при испытании одного и тем более разных двигателей и в разное время, можно сопоставлять лишь после соответствующей обработки и приведения их к единым или так называемым стандартным условиям. На некоторых режимах работы степень сопоставимости испытаний вообще предопределяется выбором параметров, по которым устанавливают нужный режим и контролируют соблюдение его в процессе испытаний.

Без выполнения названных условий бывает трудно, а чаще всего невозможно сравнивать между собой результаты отдельных одноименных испытаний. Причины этого заключаются, во-первых, в том, что показатели двигателей, кроме всего, зависят от параметров окружающей среды, т. е. от давления, температуры и влажности атмосферного воздуха, которые могут иногда изменяться от замера к замеру; во-вторых, при работе на частичных нагрузках возникают трудности с воспроизведением нужных режимов испытаний.

Давление атмосферного воздуха и индикаторная мощность, развиваемая двигателями без наддува, как известно, связаны между собой почти прямолинейной зависимостью, если температура и влажность воздуха неизменны. В таких случаях можно с достаточной для практики точностью считать, что значения индикаторной мощности N_i и N'_i и абсолютного атмосферного давления B_i и B'_i находятся в соотношении

$$N_i/N'_i = B_i/B'_i.$$

Влажность атмосферного воздуха пропорционально снижает плотность сухого воздуха и, следовательно, весовую долю его во влажном воздухе при данных температуре и абсолютном барометрическом давлении. Поэтому с увеличением влажности атмосферного воздуха индикаторная мощность двигателя уменьшается прямо пропорционально весовой доле сухого воздуха во влажном. А поскольку в оговоренных условиях плотность сухого воздуха пропорциональна парциальному давлению его, то

$$N_i/N'_i = (B_i - \varphi p_s)/(B'_i - \varphi' p_s),$$

где $B_i - \varphi p_s$ и $B'_i - \varphi' p_s$ — давления сухого атмосферного воздуха, мм рт. ст.; φ и φ' — относительные величины влажности воздуха, %; p_s — парциальное давление водяного пара, насыщающего воздух при данной температуре (берут из таблиц); φp_s и $\varphi' p_s$ — парциальные

давления водяных паров во влажном воздухе в мм рт. ст. при условиях опыта.

Влияние температуры воздуха на величину индикаторной мощности двигателя легко можно выявить, если исходить из хорошо известного положения, что $N_i = f(\eta_v)$. Иными словами, при условиях сохранения одинаковыми величин η_i , α и n , индикаторная мощность изменяется прямо пропорционально изменению количества воздуха G_b , поступающего в цилиндры двигателя в единицу времени:

$$N_i/N'_i = G_b/G'_b,$$

а это равносильно тому, что мы принимаем

$$N_i/N'_i = \sqrt{\Delta p \rho_b} / \sqrt{\Delta p' \rho'_b},$$

где Δp и $\Delta p'$ — перепады давлений при впуске; ρ_b и ρ'_b — соответствующие величины плотности воздуха.

Для случая, когда $B_i = B'_i$, можно допустить равенство $\Delta p = \Delta p'$, так как эти величины мало зависят от температуры. С другой стороны, плотность воздуха изменяется обратно пропорционально величинам его абсолютных температур и, следовательно,

$$N_i/N'_i = \sqrt{\rho_b/\rho'_b} = \sqrt{T'/T} = \sqrt{(273+t')/(273+t)}.$$

Таким образом, учитывая указанные соотношения, результаты испытаний легко можно привести к одним и тем же стандартным атмосферным условиям.

За стандартные атмосферные условия в ГОСТ 14846—69 приняты: барометрическое давление 760 мм рт. ст., температура $+20^\circ\text{C}$ и относительная влажность воздуха 50%, соответствующая давлению водяных паров, равному 9 мм рт. ст. По ГОСТ 18509—73 за стандартные принимают те же окружающие атмосферные условия, но барометрическое давление выражают в паскалях ($101,3 \text{ кПа} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$).

Если обозначить через N_i индикаторную мощность при условиях опыта, т. е. условиях окружающей среды с давлением B_i , температурой t и относительной влажностью воздуха ϕ , а через N_{i0} — индикаторную мощность, приведенную к стандартным атмосферным условиям, то получим следующую формулу приведения:

$$N_{i0} = N_i [(760 - \phi_0 p_s) / (B_i - \phi p_s)] \sqrt{(273+t)/(273+t_0)}.$$

Приведение эффективной мощности к стандартным атмосферным условиям не отличается от рассмотренной, когда N_e изменяется примерно пропорционально величине N_i . В таких случаях в формулу приведения достаточно вместо N_i подставить значение N_e . Учитывая, что $\phi_0 p_s = 9$ мм рт. ст. и $t_0 = 20^\circ\text{C}$, имеем

$$N_{e0} = N_e [751 / (B_i - \phi p_s)] \sqrt{(273+t)/293}.$$

Величину φp_s берут по таблицам, номограммам или определяют по формуле (мм вод. ст.)

$$\varphi p_s = p_s - c(t_{\text{сух}} - t_{\text{вл}})(B_t/760),$$

где $t_{\text{сух}}$ и $t_{\text{вл}}$ — показания сухого и влажного термометров психрометра, °C; $c=0,5$ — коэффициент принимают таким, пока бывает влажной кисея на баллончике со ртутью влажного термометра.

В общем случае приведенная мощность

$$N_{e0} = N_e A_0,$$

где A_0 — коэффициент приведения к стандартным условиям.

При неизменных B_t , φ и t коэффициент A_0 постоянен, а когда в процессе снятия характеристики параметры окружающей среды изменяются незначительно, то в немашинных расчетах следует применять среднее значение A_0 . Величину его можно подсчитать по упрощенной формуле

$$A_0 = [751/(B_t - \varphi p_s)] [(545 + t)/565],$$

в которой множитель $(545 + t)/565$ получен по результатам разложения в ряд Тейлора выражения $\sqrt{(273 + t)/293}$ и практически не снижает точности подсчета N_{e0} .

В исследовательских испытаниях учитывают еще поправку (мм рт.ст.) на приведение высоты столба ртути барометра к 0°С по формуле

$$B = B_t - \Delta B,$$

где B_t — показания ртутного барометра при данной температуре $t^\circ\text{C}$, мм, а ΔB — поправка на приведение к 0°С величины B_t : $\Delta B = 0,000163 B_t t$.

Однако указанные ранее формулы приведения применимы только на режимах работы с полной нагрузкой, когда мощность трения невелика по сравнению с развиваемой двигателем и эффективная мощность почти пропорциональна индикаторной. На частичных

Таблица XIII.1

Условия применения поправок	Изменение мощности, крутящего момента и среднего эффективного давления, %	
	бензиновых двигателей с искровым зажиганием, четырех- и двухтактных двигателей	дизелей четырех- и двухтактных без наддува и с наддувом от нагнетателя с механическим приводом
При изменении температуры воздуха на каждые 10°С в диапазоне 10÷60°С	1,8	2,2
При изменении давления на каждые 10 мм рт. ст. не ниже 600 мм рт. ст.	1,35	

нагрузках доля мощности трения возрастает и указанная пропорциональность утрачивается.

По ГОСТ 14846—69 к стандартным условиям приводят результаты испытания двигателей с внешним смесеобразованием, работавших при полностью открытом дросселе, а двигателей с внутренним смесеобразованием — при полной подаче топлива, по следующим параметрам: мощность, крутящий момент и среднее эффективное давление. Для дизелей без наддува и с наддувом от нагнетателя с механическим приводом к стандартным условиям по этому ГОСТу приводят также часовой расход топлива. При этом ГОСТ рекомендует пользоваться непосредственно нормативами табл. XIII.1 с учетом барометрического давления за минусом давления водяных паров по графикам, приведенным на рис. XIII.16.

Если испытания проводились при температуре воздуха $t > 20^\circ\text{C}$ и давлении воздуха меньше 751 мм рт. ст. (с учетом его влажности), то получаемые величины мощности, крутящего момента и среднего эффективного давления должны быть увеличены в соответствии с данными табл. XIII.1. Наоборот, когда $t < 20^\circ\text{C}$, а $(B_t - \varphi p_s) > 751$ мм рт. ст., они должны быть соответственно уменьшены.

Приведение часового расхода топлива к стандартным атмосферным условиям для дизелей делают следующим образом. При изменении температуры воздуха на каждые 10°C в диапазоне $10 \div 60^\circ\text{C}$ и неизменном положении рейки насоса часовой расход топлива G_T

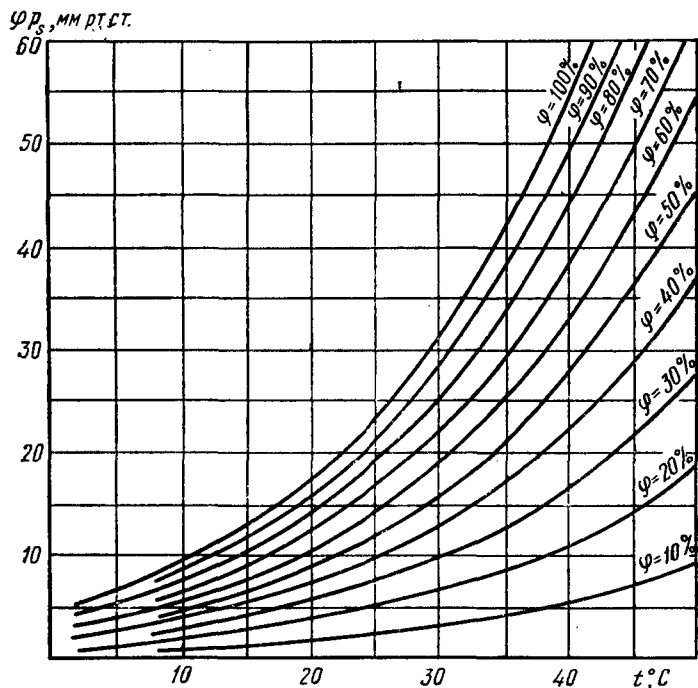


Рис. XIII.16. Парциальное давление водяного пара во влажном воздухе

изменяют на 1,5%. Для случаев, когда $t > 20^\circ \text{C}$, замеренный расход топлива увеличивают на указанную поправку и соответственно снижают, если $t < 20^\circ \text{C}$.

По ГОСТ 18509—73 показатели четырехтактных тракторных дизелей без наддува и с турбонаддувом приводят к стандартным условиям с учетом температуры и плотности топлива при полной его подаче на номинальном скоростном режиме и на режиме максимальной мощности. Стандартными для топлива приняты температура $+ 20^\circ \text{C}$ и плотность $0,83 \text{ т/м}^3$.

Следует отметить, что методы испытаний и обработки результатов, регламентированные в отдельных странах, предусматривают различную комплектность испытуемых двигателей и неодинаковые атмосферные условия, принимаемые в качестве стандартных (табл. XIII.2). Вследствие этого при испытании одного и того же двигателя по стандартам разных стран получают разные выходные значения мощности и других оценочных параметров.

Таблица XIII.2

Стандарты	Комплектность двигателей							Стандартные условия испытаний	
	Воздухоочиститель	Глушитель	Генератор	Вентилятор	Радиатор	Водяной насос	Компрессор	Температура, $^\circ \text{C}$	Давление, мм рт. ст.
SAE (США) DIN (ФРГ)	Снят Установлен	Снят Установлен	Снят Установлен	Снят Установлен	»	Снят Установлен	Снят »	29,4 20	746,5 760
BS (Англия) JIS (Япония)	А Установлен	А Снят	» »	Б Установлен	» »	» »	» »	29,4 15	749 760
ГОСТ 14846—69	»	»	»	Снят	»	»	»	20	760

Примечание: А — на впуске и выпуске должно быть противодавление, равное противодавлению при серийном воздухоочистителе и глушителе; Б — с вентилятором только для двигателей воздушного охлаждения.

Наибольшую мощность получают при испытании по SAE, наименьшую — по DIN. При испытании дизелей по этим стандартам рекомендуется следующая формула пересчета [57]:

$$N_{\text{DIN}} = 0,927 N_{\text{SAE}} - 1,9,$$

где N_{DIN} и N_{SAE} — максимальная мощность двигателя соответственно по DIN и SAE.

Соотношения между результатами испытаний по ГОСТу и стандартам других стран с достаточной точностью можно пересчитать по формулам (л. с.):

$$N_{\text{ГОСТ}} = 1,08 N_{\text{DIN}}; \quad N_{\text{ГОСТ}} = 1,06 N_{\text{BS}}; \quad N_{\text{ГОСТ}} = 1,03 N_{\text{JIS}}.$$

При исследовании двигателей большое значение имеет также

возможность воспроизведения и сопоставления результатов испытаний на частичных нагрузках, особенно при снятии регулировочных и других специальных характеристик. Для этих целей часто нормируют расход воздуха в единицу времени, разрежение во впускном тракте и даже величину открытия дроссельных заслонок.

С точки зрения строгой воспроизводимости нагрузочных режимов из названных установочных параметров фактически приемлем лишь расход воздуха G_v . Это рабочее тело, поступающее в цилиндры двигателя, и одинаковость расхода его, безусловно, определяют сопоставимость нагрузок на принятом скоростном режиме. Иногда используют также величины, пропорциональные расходу воздуха или производные от него — коэффициент наполнения η_v и мощность N_e , выражаемую в процентах. Данный способ не очень удобен, поскольку требует замера расхода воздуха и поэтому не всегда пригоден.

По величинам разрежений в задрроссельном пространстве вообще трудно сопоставлять результаты испытаний. Действительно, одинаковость величин разрежений в задрроссельном пространстве вовсе не означает равновеликость нагрузок, если испытания проводились при различных барометрических давлениях атмосферного воздуха. Например, при $B_t = 770$ и $B_t' = 730$ мм рт. ст. средние давления на входе в цилиндры различаются на 40 мм рт. ст., вследствие чего нельзя вообще обеспечить одинаковое их наполнение. Стало быть, и результаты будут несопоставимы. Даже в случаях, когда в интересах достижения большей сопоставимости, серию испытаний проводят за один прием, в один и тот же день возможны некоторые расхождения результатов из-за колебаний барометрического давления в течение дня.

Совсем неудовлетворительным установочным параметром является величина открытия дроссельной заслонки, поскольку малейшие отклонения ее от требуемого положения на некоторых режимах работы заметно отражаются на расходе воздуха.

Опыт автора, проверенный многолетней практикой в лаборатории двигателей МАМИ, показывает, что весьма удобным параметром для указанных целей служит величина давления во впускном тракте $p_{вп}$, измеряемая в мм рт. ст. Настройка двигателя на нужный режим нагрузки по $p_{вп}$ проще настройки по расходу воздуха и не уступает ему по точности. Для выхода на режим и контроля за ним требуется лишь обычный ртутный пьезометр, по которому легко можно поддерживать во впускном трубопроводе требуемое давление,

$$p_{вп} = B_t - \Delta p_{вп}$$

путем корректирования величины разрежения $\Delta p_{вп}$ с целью сохранения $p_{вп} = \text{const}$ независимо от колебаний давления B_t окружающей среды.

Способ настройки по $p_{вп}$ основан на существующей взаимосвязи между этим установочным параметром и относительным наполнением цилиндров, характеризуемым коэффициентом наполнения η_v .

Взаимосвязь можно проследить по графикам (рис. XIII.17, а),

построенным по результатам испытаний двигателя ЗИЛ-130. Анализ графиков свидетельствует, что в широком диапазоне скоростных режимов значения η_v изменяются прямо пропорционально $p_{вп}$, а в случаях перехода с одного скоростного режима на другой η_v различаются между собой всего на 3—6%. Благодаря этому при $n = \text{const}$ представляется возможным с достаточной точностью выбирать и многократно повторять нужные одинаковые нагрузки, поддерживая принятые значения $p_{вп}$ с точностью ± 3 мм рт.ст. и имея в виду, что в условиях лаборатории температура воздуха поддается некоторой стабилизации.

Рассматриваемый способ контроля за наполнением цилиндров не требует постоянных измерений фактического расхода воздуха, что ценно при обследованиях, например, токсичности отработавших газов или других аналогичных показателей, когда и комплектность двигателя должна отвечать эксплуатационной, и расход воздуха в сравниваемых испытаниях должен быть одинаков. Способ настройки по давлению $p_{вп}$ можно использовать еще более широко, если учитывать не абсолютные, а относительные величины $p_{вп}$.

Действительно, абсолютные величины $p_{вп}$ в диапазоне скоростей от малых до номинальных оборотов вала двигателя при работе с полностью открытыми дроссельными заслонками различаются, как известно, на 50÷60 мм рт.ст. По мере роста числа оборотов вала значения $p_{вп}$ уменьшаются, вследствие чего величины коэффициента η_v для одних и тех же значений $p_{вп}$ на различных скоростных режимах тоже не остаются строго одинаковыми, хотя «разброс» их и невелик (рис. XIII.17, а). Если же для каждого принятого числа оборотов вала величины $p_{вп}$ выражать в процентах от его значений при этих оборотах на полных нагрузках, то оказывается, что величины η_v ложатся практически на одну прямую линию независимо от скоростного режима (рис. XIII.17, б).

Таким образом, относительное наполнение цилиндров на дроссельных режимах хорошо согласуется с общей для поршневых двигателей закономерностью, изменяясь прямо пропорционально относительной величине $p_{вп}$. В частности, полученная закономерность полностью согласуется с относительной характеристикой наполнения поршневых двигателей на полных нагрузках [37].

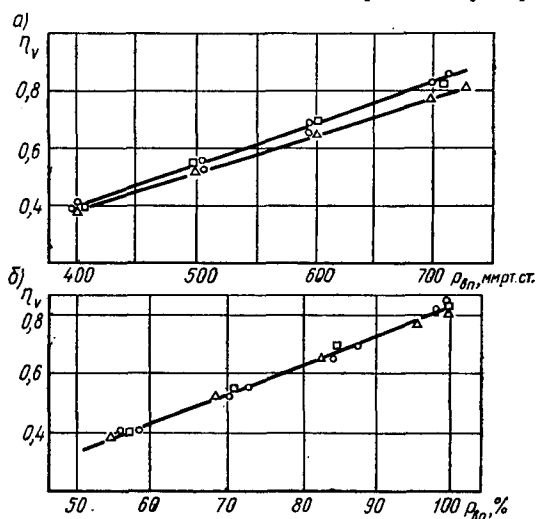


Рис. XIII.17. Зависимость η_v от давления $p_{вп}$ во впускном трубопроводе

**§ XIV.1. Общие требования
к лабораториям двигателей**

Современные лаборатории для испытания двигателей представляют собой сооружения со сложным инженерным оборудованием. Требования, которым они должны удовлетворять, обуславливаются назначением испытаний и методикой, положенной в основу технологии их проведения, а также необходимостью создания санитарно-технических и безопасных условий труда для персонала испытателей, обеспечения пожарной безопасности и др. [6].

Технологические требования при любых видах испытаний кратко сводятся к следующему:

оборудование испытательных стендов и вспомогательных устройств должно обеспечивать проведение испытаний полностью по установленной программе с минимальными затратами времени на выполнение монтажно-демонтажных и других подготовительных работ и с точностью измерения отдельных параметров, допускаемой для данного вида испытаний (см. гл. I);

помещения лаборатории должны быть оснащены необходимыми подъемно-транспортными средствами, централизованной подачей топлива и всеми видами энергетических и промышленных коммуникаций, без которых нельзя обеспечить успешное проведение испытаний;

испытательные стенды и вспомогательное оборудование лабораторий необходимо подбирать и размещать, кроме всего, с учетом удобной эксплуатации оборудования и возможности автоматизации наиболее трудоемких испытаний и отдельных измерительных систем.

Санитарно-технические требования предусматривают:

обеспечение лабораторных помещений эффективной приточно-вытяжной вентиляцией, необходимой для технических целей и исключения возможности загрязнения их атмосферы вредными веществами сверх предельно допустимой концентрации, установленной союзными нормами для рабочих помещений, в том числе, на содержание в них окиси углерода, паров топлива и масла, паров ртути (при пользовании ртутными пьезометрами) и других ядовитых веществ;

создание необходимых бытовых удобств для обслуживающего персонала лабораторий, включая действующие нормы на площадь и кубатуру помещений с вредными условиями труда, их освещение, отопление и водоснабжение;

применение материалов для строительных конструкций, не взаимодействующих с ядовитыми веществами (ртутные пары и др.);

борьбу с шумом в помещениях, где возможно длительное пребывание обслуживающего персонала, и вне стен лаборатории, поскольку в зоне 300 м от лаборатории уровень шума не должен превышать 70 дБ.

Требования техники безопасности предусматривают:

мероприятия, исключающие травматизм и производственные заболевания, регулярный надзор за оборудованием, проведение инструктажа новых рабочих и соблюдение приемов работы на каждом рабочем месте;

регламентируют обеспечение персонала защитными приспособлениями, спецодеждой и работу с ртутными приборами. Стекланные трубки последних должны закрываться органическим стеклом, иметь улавливающие устройства на выходе из трубок и сборники под ними (на случай аварии). Для устранения возможности выхода паров ртути в помещение поверхность ее в приборах закрывают слоем защитной жидкости (например, водой). Пролитую на пол ртуть тщательно удаляют, например, 20%-ным раствором хлорного железа.

Требования пожарной безопасности включают мероприятия, предупреждающие взрывы и пожары в лабораториях, относящихся в целом к категории пожароопасных сооружений. Трубопроводы централизованной подачи топлива рекомендуется прокладывать только с внешней стороны здания, а на вводе в помещение они должны иметь запорные вентили и надежно заземлены. Для обеспечения безопасности необходимы: периодический контроль оборудования топливных систем; организация хранения обтирочных и горючих материалов в закрытой таре, запас которых не должен превышать сменной потребности; особые меры предосторожности при выполнении сварочных работ, разрешаемых соответствующими инструкциями; постоянная готовность местных средств пожаротушения (песок, кошма, углекислые огнетушители), припасенных в нужных количествах и расположенных в доступных местах, так как в помещениях лаборатории возможность загорания особенно велика.

Материалы, идущие на изготовление полов и покрытие внутренних стен, должны быть износо- и огнестойки и непроницаемы для топлива и масел.

§ XIV.2. Испытательные установки

Установки для лабораторных испытаний двигателей внутреннего сгорания представляют собой комплекс, состоящий из тормозного устройства, фундамента с подmotorной плитой, специальных картеров или подставок (стоек) крепления двигателя, соединительного вала для передачи крутящего момента от двигателя к тормозу, пульта управления, контрольных и измерительных устройств, вспомогательных и различных дополнительных устройств, обеспечивающих проведение испытаний по заданной программе.

Согласно существующим ГОСТам лабораторная установка типовых испытаний должна быть оснащена устройствами для: охлаждения цилиндров двигателя и картерного масла, питания двигателя топливом и воздухом, отвода отработавших и картерных газов и т. д.

Установки для проведения научно-исследовательских испытаний имеют еще более сложную оснастку. Часто основой их служат одноцилиндровые отсеки каких-либо двигателей, устанавливаемые на так называемые универсальные картеры.

Универсальный испытательный картер под одноцилиндровый отсек двигателя в общем случае представляет собой конструкцию с рядом механизмов, в том числе для уравнивания кривошипно-шатунного механизма, регулирования степени сжатия испытуемого двигателя и положения фаз газораспределения. Коленчатый вал картера составной, что позволяет изменять величину радиуса кривошипа. Цилиндр испытуемого двигателя устанавливают на опорное кольцо, которое можно перемещать по вертикали на 30 мм, причем величина перемещения фиксируется специальным прибором-счетчиком числа оборотов рукоятки переставляющего механизма.

Механизмы картера смазываются под давлением от циркуляционной системы смазки, действующей по принципу «сухого картера», поэтому запас масла хранится в отдельном баке. Отдельно от картера выполнены также система, регулирующая тепловое состояние испытуемого двигателя, и другие устройства, управление которыми осуществляют с общего пульты.

Установки для типовых и исследовательских испытаний проектируют с учетом того, что любые поршневые двигатели всегда вызывают большие или меньшие вибрации, поскольку в принципе такие двигатели нельзя полностью уравновесить, т. е. обеспечить их действие на свои опоры с усилиями, постоянными по величине и направлению. Этому препятствует неравномерное протекание крутящего момента и наличие равного ему по величине, но направленного в противоположную сторону опрокидывающего момента, воспринимаемого опорами и фундаментом стенда, несущим двигатель и тормоз.

Фундамент стендов выполняют поэтому в виде, например, монолитного бетонного блока, не связывая его жестко с фундаментом здания и вспомогательных устройств самой установки [55]. Это позволяет снижать до минимума вибрацию близлежащих сооружений и конструкций при работе двигателя. Известно, что вибрации в помещении испытательной установки возрастают с увеличением амплитуды колебаний фундамента стенда и не только нарушают работу измерительной аппаратуры установки, но в определенных условиях при возникновении резонанса между частотой колебаний фундамента стенда и здания могут вызвать разрушение здания или его элементов.

Вертикальные колебания фундамента стенда обычно снижают путем размещения упругой прослойки между основной его массой и подошвой. Упругую прослойку выполняют из пробковых плит, резины, войлока, дерева или другого приемлемого материала. От передачи горизонтальных колебаний сооружения защищают с помощью 10—15 см воздушного промежутка, которым отделяют от них фунда-

мент испытательной установки. Глубина заложения монолитного фундамента установки составляет примерно 1,0—1,5 м. Желательно, чтобы она не была меньше глубины заложения фундамента здания. При наличии под лабораторией технического подвала фундамент стенда закладывают в помещении подвала и выполняют его в виде арки или шахты с массивными стенками, через которую отсасывают воздух из помещения и размещают в ней выпускной трубопровод двигателя (см. рис. XIV.5, позиция 4).

На подготовленный фундамент укладывают массивные подмоторные плиты и крепят их анкерными болтами или устанавливают на специальные амортизаторы (резино-гидравлические, резино-металлические и др., см. поз. 5 рис. XIV. 5). Наиболее удобными являются литые чугунные плиты с хорошо обработанной у них рабочей поверхностью. При отсутствии специальных литых подмоторных плит применяют плиты, собранные из двутавровых балок, и заливают их бетоном. На рабочей стороне литых плит делают Т-образные продольные пазы под головки болтов крепления опорных стоек, основание которых в свою очередь выполняют с прорезями под указанные болты. Благодаря этому стойки можно перемещать вдоль и поперек плиты, выбирая для них место с учетом габаритов испытуемого двигателя. Стойки отливают из чугуна или выполняют сварными из стального проката и снабжают специальными суппортами, которые с помощью грузового винта можно перемещать вверх или вниз и фиксировать в нужном для двигателя положении.

Соединительный вал, передающий крутящий момент от двигателя к тормозу, часто выполняют в виде короткого двухшарнирного карданного вала обычного автомобильного типа с телескопическим шлицевым сочленением одной из вилок шарнира с наконечником вала. Но независимо от этого добиваются максимально возможной соосности между валами двигателя и тормоза.

Успешное проведение как типовых, так и исследовательских испытаний невозможно без тщательного соблюдения принятого теплового режима. Нарушение теплового состояния оказывает влияние на величину внутренних потерь в двигателе, на процессы приготовления рабочей смеси и тепловые потери, что неизбежно отражается на мощностных и экономических показателях двигателя. Поэтому испытательные установки по возможности оснащают устройствами, позволяющими автоматически поддерживать нужную температуру охлаждающей жидкости и смазочного масла [55]. В настоящее время отечественная промышленность выпускает электронные регуляторы температуры типа РПИБ, кото-

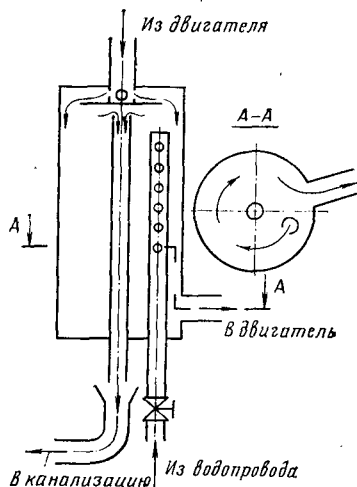


Рис. XIV.1 Смесительный бак системы охлаждения двигателя

рые по своей надежности и компактности отвечают самым строгим требованиям при использовании их в системах автоматического регулирования теплового состояния двигателей. Автоматизированные системы, кроме всего, обеспечивают быстрый прогрев двигателя до нужного теплового состояния. Однако в системах охлаждения применяют и обычные смесительные баки (рис. XIV.1). Нужный перепад температур на выходе из двигателя и на входе в его систему охлаждения обеспечивают в этом случае путем добавки воды из водопроводной сети и слива в канализацию соответствующего количества нагретой воды.

Автоматизированные испытательные установки широко применяют в современных лабораториях для проведения исследовательских и трудоемких типовых испытаний по установленной программе. На рис. XIV.2 показана блок-схема такой установки, разработанной Горьковским проектно-конструкторским и технологическим институтом (ГПКТИ), которая успешно эксплуатируется в лабораториях отечественных заводов. Система автоматически пускает двигатель, нагружает его и в соответствии с программой выключает, охлаждает и вновь пускает, повторяя циклы по программе. Диапазоны регулирования нагрузок 0—50 кгс·м, скорости вращения вала 500—5000 об/мин при 9 режимах цикла испытаний длительностью 0—90 мин.

Система автоматически контролирует 15 режимов, 8 регистрирует и по 11 параметрам осуществляет аварийную защиту двигателя от опасных нарушений программы испытаний. В обычных условиях погрешности в соблюдении заданной программы не превышают $\pm 1\%$. Система работает от сети 220 В, 50 Гц и потребляет не более 500 Вт энергии.

§ XIV.3. Примеры планировок лабораторий

Современные лаборатории для испытания двигателей размещают в отдельных зданиях или в корпусах, спланированных для таких именно целей, как делают это на моторостроительных заводах. Инженерное оборудование рассчитывают и проектируют так, чтобы к каждому объекту испытаний подавались потребные количества электрической энергии, воды, воздуха, топлива, масла, а также удалялись от них в атмосферу отработавшие газы. Такие помещения обязательно оборудуют приточно-вытяжной вентиляцией, развитыми обособленными канализационными коммуникациями, устройствами для эффективного глушения шума отработавших газов двигателей, подъемными и транспортными средствами и т. д. Для размещения многих инженерных устройств и части оборудования лабораторные помещения строят с емкими техническими подвалами.

Испытательные установки проектируют с учетом особенностей конкретных типов двигателей и, как правило, располагают в обособленных друг от друга помещениях, причем каждую такую ячейку (бокс) разделяют на моторную часть, в которой устанавливают испытуемый двигатель, и пультовую для испытателей. Последнюю выно

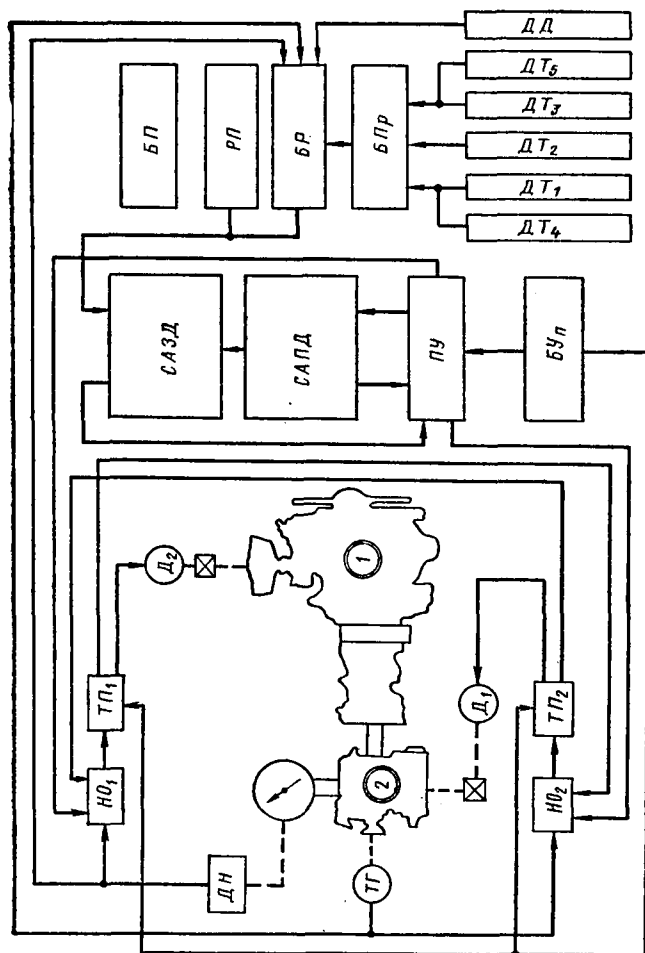


Рис. XIV.2. Блок-схема автоматизированной испытательной установки системы ГПКТИ:

БП — блок питания; РП — реле протока; БР — блок регистрации; БПР — блок преобразователей; ТП, ДН, ДД, ДТ, ДТ₁, ДТ₂, ДТ₃, ДТ₄, ДТ₅, ДТ₆ — соответственно датчики оборотов, нагрузки, давления и температуры; БУП — блок управления; ПУ — программное устройство; САПД — система автоматического пуска двигателя; САЗД — система аварийной защиты двигателя; Д₁, Д₂ — исполнительные электродвигатели; ТП₁, ТП₂ — тиристорные преобразователи; НО₁, НО₂ — нуль-органы; 1 — испытуемый двигатель; 2 — тормозное устройство

сят иногда в общий зал для наблюдений. Благодаря этому обслуживающий персонал оказывается в помещении, изолированном от моторной части бокса, и может работать в спокойных условиях, управляя двигателем на расстоянии. Визуальное наблюдение за работающим двигателем ведется через застекленный проем в звуко-непроницаемой перегородке.

Чтобы повысить эффективность гашения шума, в лабораториях стены облицовывают панелями из пористых материалов. В порах звуковые волны вызывают колебания воздуха и вследствие возник-

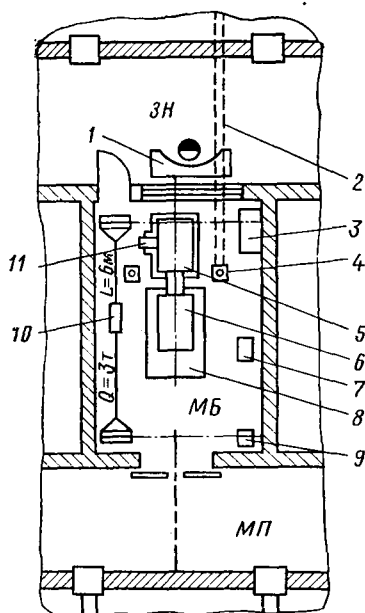


Рис. XIV.3. Планировка типовой лаборатории тракторных двигателей

новения внутреннего трения звуковая энергия колебаний частично преобразуется в тепло. Наиболее употребительными являются волокнисто-пористые материалы (стекловолокно, минеральная шерсть, шлаковая вата, отходы капронового волокна и т. п.).

Под моторные боксы типовых испытаний отводят 30÷40 м² площади, высота потолков в них составляет 4—6 м, а глубина технических подвалов около 4 м. Примерная планировка отдельной ячейки, рассчитанной на проведение испытаний поршневых двигателей автомобильного и тракторного типов, показана на рис. XIV.3.

В приведенной планировке лаборатории для испытания тракторных двигателей пульт 1 управления вынесен в общий зал наблюдений ЗН. С противоположной стороны ряда моторных МБ и других боксов лаборатории предусмотрен магистральный проезд МП, по которому транспортируют испытуемые двигатели и оборудование.

Моторный бокс оснащен кран-балкой 10 с электрической талью, грузоподъемностью 3 Т (≈ 30 кН). Испытуемый двигатель 5 установлен в нем на подмоторную плиту 8 и муфтой соединен с электрической тормозной машиной 6 постоянного тока мощностью 200 кВт, которая сблокирована с прибором 11 (динамометром) для замера крутящего момента. В боксе размещены также масло- 7 и водоводяной 9 радиаторы, с помощью которых поддерживают необходимый тепловой режим испытуемого двигателя. Приемники 4 отработавших газов соединены с выпускным трубопроводом 2. Последний заглублен до 3 м и с небольшим уклоном выведен в общий коллектор выпуска отработавших газов. Кроме слесарного верстака 3, в моторном боксе нет другого вспомогательного оборудования, а электрические агрегаты, обслуживающие тормозную машину, размещены в отдельном помещении лаборатории — умформерной, т. е. вынесены за пределы бокса.

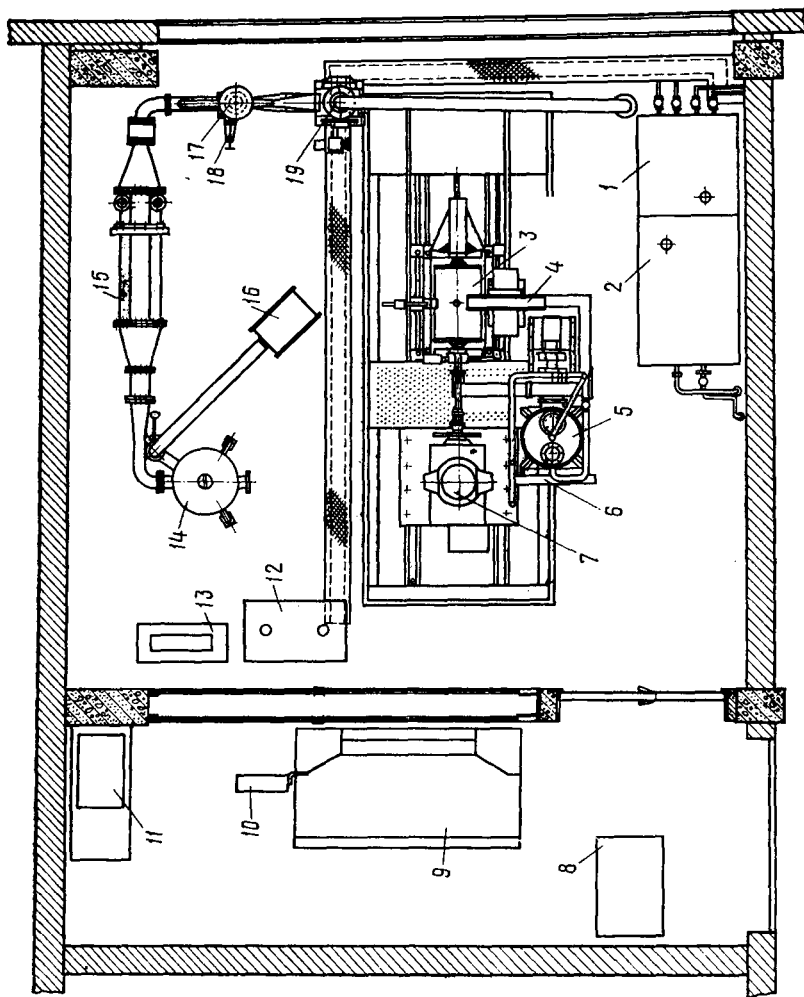


Рис. XIV.4. Планировка испытательной ячейки под одноцилиндровую исследовательскую установку

Описанный моторный бокс позволяет выполнять в основном типовые испытания двигателей. Под исследовательские испытания лаборатории оснащают тщательнее и более сложным оборудованием, для размещения которого требуются значительно большие площади. В качестве примера на рис. XIV.4 приведена общая планировка испытательной ячейки, предназначенной под одноцилиндровую исследовательскую установку.

Центральное место в моторном боксе занимает универсальный картер 7 под одноцилиндровый отсек двигателя, который карданным валом соединен с электрической тормозной машиной 3 постоянного тока мощностью 50 кВт. Для измерения крутящего момента, развиваемого двигателем, служит динамометр 4 с двухмаятниковой весовой головкой, заблокированный в одном агрегате с электрической машиной 3; устройства для регулирования температуры охлаждающей воды 2 и смазочного масла 1 в системе; устройства 12 и 13 для измерения часового расхода топлива и в данный текущий момент. Здесь же расположены устройства 19 для определения расхода воздуха с регулируемым клапаном 17 и вентилем 18 и устройства 15 для его подогрева до нужной температуры. Система питания двигателя воздухом снабжена двумя вспомогательными выравнителями 14 и 16 движения потока воздуха, причем выравнитель 16 расположен на входе в карбюратор. Справа от картера 7 смонтирована система 5 отвода отработавших газов с вентилятором отсоса и комплект термостатов 6 для термопар.

В помещении для наблюдений у застекленного звуконепроницаемого проема стены расположен пульт 9 управления установкой и в непосредственной близости с ним щит 10 с жидкостными манометрами, приборный шкаф 8 и осциллограф 11 для записи параметров быстропротекающих процессов. Силовые шкафы, умформер, компрессорное оборудование, водо-маслоотстойники, ресивер, холодильник и другое вспомогательное оборудование испытательной установки размещено в техническом подвале лаборатории.

На рис. XIV.5 показаны подъемно-транспортные средства и система вентиляции рассматриваемого помещения, имеющего кран-балку с тельфером 9 и приточно-вытяжную вентиляцию. Вентилятор 7 всасывает воздух через калорифер 6 и подает его в камеру 8 ввода в помещение, в которое он поступает через отверстия в верхнем перекрытии. Из помещения воздух отсасывают вентилятором 3 через решетку зоны испытательного стенда в шахту 4, расположенную под стендом в подвальном помещении. Далее воздух поступает в камеру 2 и по воздуховоду 1 выбрасывается в атмосферу. При такой системе вентиляции, которую широко используют в лабораториях двигателей, пары топлива и масла надежно и полностью отсасываются из помещения сразу же от источника их возникновения.

Фундаментные плиты испытательного стенда в данном случае установлены на специальные резино-металлические амортизаторы 5, обеспечивающие защиту конструкций помещения от воздействия вибрации испытательной установки.

В качестве примера современной лаборатории двигателей кратко

рассмотрим лабораторию фирмы «Волво», рассчитанную на испытания карбюраторных двигателей с рабочим объемом 1,8 л и скоростью вращения вала до 7000 об/мин, а также дизелей с рабочим объемом цилиндров до 9,6 л. Ее испытательные установки оснащены электрическими тормозами и приспособлены для проведения определенных испытаний, в том числе на безотказность (долговечность), получение мощностных и других характеристик, измерение шума, вибраций, обследования работы систем охлаждения, смазки и т. д.

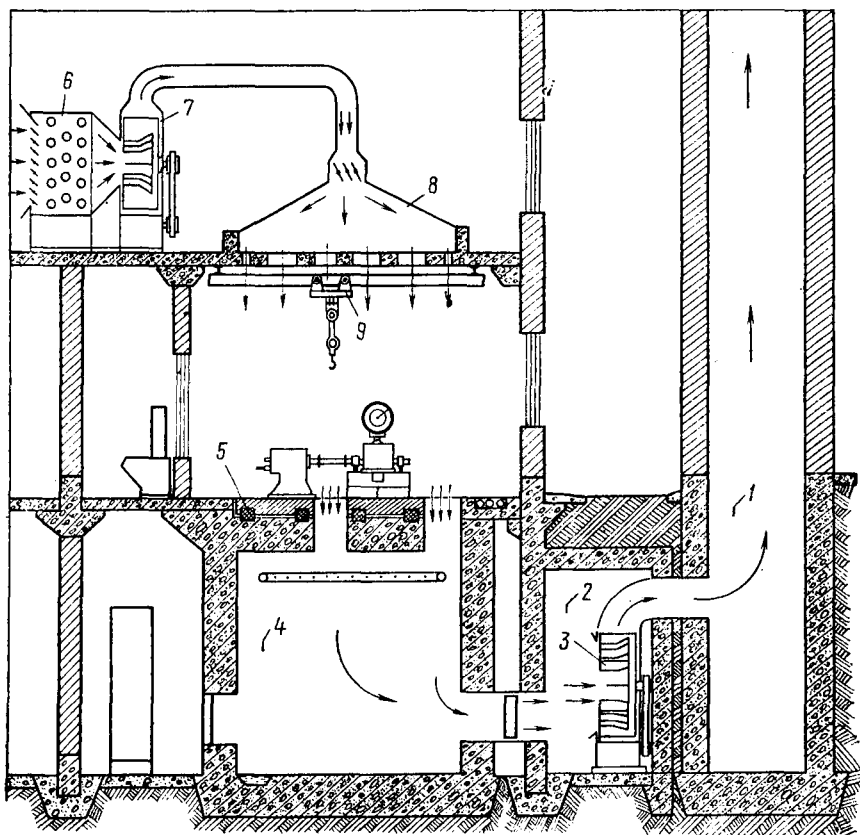


Рис. XIV.5. Система вентиляции и транспортные средства испытательной ячейки (см. рис. XIV.4)

Все стенды размещены непосредственно на полу первого этажа без обычных фундаментов под двигатель и тормоз. Вместо бетонного фундамента применены особые амортизаторы, а двигатели на испытательные станки устанавливают на их стандартные эластичные резиновые опоры. Благодаря этому, кроме удешевления строительства, подвальное помещение полностью используют под коммуникации и вспомогательное оборудование. Водомасляные радиаторы, насосы,

регуляторы и прочие устройства смонтированы в вентилируемых туннелях в подвале непосредственно под испытательными стендами. К каждому стенду подведены пять сортов топлива и три масла. Емкость баков под основное топливо составляет почти 36 тыс. л, для специальных — более 5 тыс. л и под масло около 1000 л.

Двигатели монтируют на станок в монтажной мастерской и перевозят в моторный бокс на тележках вручную. По окончании испытаний вместе со станком двигатель удаляют из бокса и заменяют другим. Продуманность конструкции присоединительных устройств позволяет завершать монтажно-демонтажные работы менее чем за 30 мин.

Расход топлива определяют путем взвешивания на автоматических весах, а затрачиваемое на это время и обороты вала двигателя регистрируют электронными импульсными счетчиками, сблокированными с весами. Автоматически регулируют также желаемый нагрев масла в картере двигателя и воды в системе охлаждения. Установки для проведения испытаний на безотказность двигателей управляются электронными устройствами, изменяющими режимы работы двигателя по заранее установленной программе, с последовательным повторением любых принятых циклов испытаний. Контроль за работой двигателя в этом случае полностью автоматизируют, что позволяет проводить длительные испытания без участия оператора с точной фиксацией режима испытаний с цифровыми записями в протоколах, по которым оценивают потом ход этих испытаний.

Электронные устройства для программирования могут включать до десяти шагов ($0 \div 9$) с заранее запланированными продолжительностью, скоростными и нагрузочными режимами, температурами нагрева охлаждающей воды и масла в картере. Кроме времени, все переменные параметры устанавливают с помощью потенциометров, встроенных в органы управления. Шаг № 0, если он предусмотрен, всегда заканчивается остановкой двигателя, который затем снова пускается согласно программе. Это позволяет полностью воспроизводить условия холодного пуска двигателя. Любой шаг от 0 до 9 может быть исключен из цикла испытаний. Переход с одного шага на другой осуществляют с помощью шагового реле типа реле телефонных станций.

В отечественных лабораториях для АСИД применяют известные информационно-измерительный комплекс КМ-2101 и др. машины советского производства.

1. Агейкин Д. И. [и др.]. Датчики контроля и регулирования. Справочные материалы. «Машиностроение», 1965.
2. Акатов Е. И. [и др.]. Работа автомобильного двигателя на неустановившемся режиме. Машгиз, 1960.
3. Андреев В. И., Черняк Б. Я. Определение состава горючей смеси по содержанию углерода в продуктах сгорания. «Автомобильная промышленность», 1972, № 12.
4. Беликов В. Н. [и др.]. Испытание авиационных двигателей. Оборонгиз, 1938.
5. Вая Я. Анализаторы газов и жидкостей. «Энергия», 1970 (перевод с чешского под ред. Арутюнова О. С.).
6. Варламов Л. И. Испытательные станции поршневых и газотурбинных двигателей. Машгиз, 1963.
7. Варшавский И. Л. [и др.]. Принцип нормирования автомобилей и двигателей по признаку токсичности. «Знание», 1969 (Сб. трудов ЛАНЭ).
8. Варшавский И. Л., Малов Р. В. Как обезвредить отработавшие газы автомобиля. «Транспорт», 1968.
9. Вихерт М. М., Филиппов Т. Р. Дымность и токсичность современных дизелей. «Автомобильная промышленность», 1972, № 9.
10. Волчек Л. Я. Методы измерений в двигателях внутреннего сгорания. Машгиз, 1955.
11. Гавриленко Б. А. [и др.]. Гидравлические тормоза. Машгиз, 1961.
12. Глаголев Н. М. Испытания двигателей внутреннего сгорания. Изд. Харьковского университета, 1958.
13. Гнатюк Е. В., Певнев Н. Г. Замер расхода газа на одноцилиндровой установке ИТ-9, конвертированной на сжиженный газ. Омск, 1971 (Сб. САДИ, вып. 2).
14. Горбунов Г. М., Солохин Э. Л. Испытания авиационных воздушно-реактивных двигателей. «Машиностроение», 1967.
15. Григорьев М. А. Износ и долговечность двигателей. Волго-Вятское книжное издательство, Горький, 1970.
16. Гурвич И. Б. [и др.]. Оценка износостойкости цилиндров двигателей ГАЗ и ЗМЗ методом ускоренных стендовых испытаний. «Автомобильная промышленность», 1971, № 11.
17. Гутер Р. С., Овчинский Б. В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. «Наука», 1970.
18. Данилов В. В. [и др.]. Газоотборочный электромагнитный клапан с электронным управлением. «Автомобильная промышленность», 1973, № 3.
19. Евангулов Л. Б. Создание и развитие конструкций гидротормозных установок для испытания роторных двигателей. Изд. МАИ, 1963 (Доклад на соискание ученой степени).
20. Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений. «Наука», 1968.
21. Зельдович Я. Б., Мышкис А. Д. Элементы прикладной математики. «Наука», 1972.
22. Золотаревский Л. С. [и др.]. Особенности отбора проб отработавших газов при испытаниях автомобиля и двигателя на токсичность. «Знание», 1969 (Сб. трудов ЛАНЭ).
23. Игнатович Н. И. Методы отбора проб отработавших газов на бенз-а-пирен. Изд. МАДИ, 1972 (Труды МАДИ, вып. 40).
24. Иогансон Р. А. Индукторные тормоза. «Энергия», 1966.

25. Иофанов С. А., Райхлин Х. М. Приборы для учета и контроля работы тракторных агрегатов. «Машиностроение», 1972.
26. Карандеев К. Б. Мостовые методы измерений. Гостехиздат УССР, 1953.
27. Карпов Р. Г. Электроника в испытании тепловых двигателей. Машгиз, 1963.
28. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. «Наука», 1970.
29. Катус Г. П. Методы и приборы для измерения параметров нестационарных тепловых процессов. Машгиз, 1959.
30. Кац С. М. Балансирные динамометры для измерения вращающего момента. Госэнергониздат, 1962.
31. Конев Б. Ф. [и др.]. Автомобильные карбюраторные двигатели. Машгиз, 1960.
32. Костров А. В. и др. Метод тарировки индикаторной диаграммы процесса впуска. «Автомобильная промышленность», 1965, № 12.
33. Кошкин В. Е. [и др.]. Методы измерения и экспериментального исследования шума и вибрации автомобильных двигателей. Изд. НАМИ, 1961 (Труды НАМИ, вып. 32).
34. Куров Б. А. Об оценке токсичности автомобильных карбюраторных двигателей. «Автомобильная промышленность», 1971, № 4.
35. Куров Б. А. Проблема борьбы с загрязнением воздуха автомобилями и пути ее решения. «Автомобильная промышленность», 1972, № 8.
36. Кюрегян С. К. Оценка износа двигателей внутреннего сгорания методом спектрального анализа. «Машиностроение», 1966.
37. Ленин И. М. Теория автомобильных и тракторных двигателей. «Машиностроение», 1969.
38. Леончик Б. И., Маякин В. П. Измерения в дисперсных потоках. «Энергия», 1971.
39. Лихолетов Н. Н., Мацкевич Н. П. Руководство к решению задач по высшей математике, теория вероятностей и математической статистике. «Высшая школа», 1969.
40. Луканин В. Н. Шум автотракторных двигателей внутреннего сгорания. «Машиностроение», 1971.
41. Мишин И. А. Долговечность двигателей. «Машиностроение», 1968.
42. Ожогин В. А. Определение среднего индикаторного давления методом гармонического анализа с неравным шагом. «Энергомашиностроение», 1967, № 2.
43. Орлин А. С., Круглов М. Г. Комбинированные двухтактные двигатели. «Машиностроение», 1968.
44. Павленко В. А. Газоанализаторы. «Машиностроение», 1965.
45. Павленко П. И. Счетно-импульсный хронометр. Изд-во физико-математической литературы, 1963.
46. Павлов М. П. Техника измерения скоростей и времени. Машгиз, 1950.
47. Павловский А. Н. Измерение расхода и количества жидкостей, газа и пара. Изд-во стандартов, 1967.
48. Петриченко Р. М., Оносовский В. В. Рабочие процессы поршневых машин. «Машиностроение», 1972.
49. Петунин А. Н. Методы и техника измерений параметров газового потока. «Машиностроение», 1972.
50. Пешехонов Н. Ф. Приборы для измерения давлений, температур и направления потока в компрессорах. Оборонгиз, 1962.
51. Райков И. Я. Износ цилиндров двигателей. Сб. «Повышение износоустойчивости деталей ДВС». «Машиностроение», 1972.
52. Ромашев В. М. О точности методов обработки индикаторных диаграмм для определения среднего индикаторного давления. «Автомобильная промышленность», 1965, № 7.
53. Скубачевский Л. С. Испытания воздушно-реактивных двигателей. «Машиностроение», 1972.
54. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. «Наука», 1969.

55. Сороко-Новицкий В. И. Испытания автотракторных двигателей. Машгиз, 1955.
56. Сорюс А. Ф., Матюхин Л. М. Измерение температур потока двухфазной смеси. Сб. «Автомобильный транспорт». Изд. МАДИ, 1970.
57. Ставров О. А. Методика приведения основных параметров дизелей к единой системе: «Автомобильная промышленность», 1972, № 10.
58. Стефановский Б. С. [и др.]. Испытания двигателей внутреннего сгорания. «Машиностроение», 1972.
59. Стечкин Б. С. [и др.]. Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя. Изд. АН СССР, 1960.
60. Темников Ф. Е. Автоматические регистрирующие приборы. «Машиностроение», 1968.
61. Темников Ф. Е., Харченко Р. Р. Электрические измерения неэлектрических величин. Госэнергоиздат, 1948.
62. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. «Энергия», 1966.
63. Утямишев Р. И. Техника измерения скоростей вращения. Госэнергоиздат, 1961.
64. Френкель Н. З. Гидравлика. Госэнергоиздат, 1956.
65. Чередниченко В. М. Стендовые и дорожные испытания газовой модификации двигателя ЗМЗ-53. «Автомобильная промышленность», 1969, № 8.
66. Шартуни Н. Ж. Зависимость мощности и экономичности карбюраторного двигателя от температуры и влажности воздуха. «Автомобильная промышленность», 1972, № 3.
67. Яковлев К. П. Математическая обработка результатов измерений. Изд-во технико-теоретической литературы, 1953.
68. Яковлев Л. Г. Приборы контроля работы силовых установок. «Машиностроение», 1969.
69. Ярышев Н. А. Теоретические основы измерения нестационарных температур. «Энергия», 1967.
70. G. George P. The effect of fuel and vehicle variables on polynuclear aromatic hydrocarbon and phenol emissions, SAE Prepr, s.s. № 720210.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I	
Методы проведения испытаний автомобильных и тракторных двигателей	
§ I. 1. Назначение и виды испытаний	5
§ I. 2. Проведение испытаний	10
§ I. 3. Требования к измерительным средствам и точности измерений	12
Глава II	
Основы теории и практики измерений, измерительных приборов и обработки результатов наблюдений	
§ II. 1. Краткие сведения об измерениях и измерительных приборах	14
§ II. 2. Погрешности измерений	19
§ II. 3. Построение графиков по данным наблюдений	24
§ II. 4. Обработка и анализ экспериментальных данных	25
Глава III	
Применение электрических измерительных систем общего назначения при исследовании двигателей	
§ III. 1. Возможности автоматизации информационных процессов	36
§ III. 2. Преобразователи неэлектрических величин в электрические. Датчики	38
§ III. 3. Промежуточные звенья измерительных систем	48
§ III. 4. Выходные устройства информационных систем	50
§ III. 5. Согласование характеристик звеньев измерительных систем	54
Глава IV	
Определение мощности двигателя	
§ IV. 1. Общие сведения	55
§ IV. 2. Измерение крутящего момента двигателя	58
§ IV. 3. Механические тормоза	72
§ IV. 4. Гидравлические тормоза	73
§ IV. 5. Электрические тормоза	88
§ IV. 6. Индукторные тормоза	100
§ IV. 7. Условия совместной устойчивой работы двигателя и тормоза	103
Глава V	
Измерение скорости вращения и времени	
§ V. 1. Общие сведения	105
§ V. 2. Тахометры, тахоскопы и тахографы	109
§ V. 3. Суммарные счетчики числа оборотов	116
§ V. 4. Измерение времени	123

Глава VI

Измерение давлений

§ VI. 1. Общие сведения	127
§ VI. 2. Жидкостные манометры	128
§ VI. 3. Микроманометры	132
§ VI. 4. Дифференциальные электромеханические манометры	134
§ VI. 5. Пружинные манометры	136
§ VI. 6. Барометры	136
§ VI. 7. Погрешности манометров	137
§ VI. 8. Измерение давлений в потоках	139

Глава VII

Измерение температуры

§ VII. 1. Общие сведения	143
§ VII. 2. Жидкостные термометры	145
§ VII. 3. Манометрические термометры	147
§ VII. 4. Термометры сопротивления	150
§ VII. 5. Термоэлектрические термометры (пирометры)	160
§ VII. 6. Измерение температуры в емкостях и потоках	170
§ VII. 7. Измерение температуры деталей двигателей	178

Глава VIII

Измерение расходов жидкостей и газов

§ VIII. 1. Общие сведения	183
§ VIII. 2. Измерение расхода воздуха	184
§ VIII. 3. Измерение расхода топлива	199

Глава IX

Анализ газов

§ IX. 1. Назначение и методы анализа газов	210
§ IX. 2. Отбор проб газа	219
§ IX. 3. Способы выражения концентрации компонентов газовой смеси	223
§ IX. 4. Применение анализа газов для оценки использования воздуха и топлива в двигателях	224

Глава X

Определение токсичности и дымности двигателей

§ X. 1. Общие сведения	228
§ X. 2. Испытания двигателей на токсичность	231
§ X. 3. Измерение дымности отработавших газов	238

Глава XI

Индицирование двигателей

§ XI. 1. Общие сведения	242
§ XI. 2. Электрические индикаторы	243
§ XI. 3. Пневмоэлектрические индикаторы	249
§ XI. 4. Тарировка индикаторов	254
§ XI. 5. Ошибки индицирования	258
§ XI. 6. Обработка индикаторных диаграмм с применением электронных вычислительных машин (ЭВМ)	261

Глава XII

Определение шума, вибрации и износа двигателей

§ XII. 1. Краткие сведения о шуме и вибрациях	266
§ XII. 2. Приборы и методы измерения шума и вибрации двигателей . . .	266
§ XII. 3. Изучение износа двигателей	272

Глава XIII

Характеристики двигателей

§ XIII. 1. Общие сведения	276
§ XIII. 2. Скоростные характеристики	276
§ XIII. 3. Нагрузочные характеристики	282
§ XIII. 4. Регулировочные характеристики	281
§ XIII. 5. Сопоставление результатов испытаний	297

Глава XIV

Лаборатории двигателей

§ XIV. 1. Общие требования к лабораториям двигателей	307
§ XIV. 2. Испытательные установки	301
§ XIV. 3. Примеры планировок лабораторий	307
Литература	315

Иван Яковлевич Райков ИСПЫТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Научный редактор Е. К. Корси. Редактор издательства О. М. Смирницкая. Худож. редактор Н. К. Гуторов. Техн. редактор З. В. Нуждина. Корректор Г. А. Чететкина.

Т — 14265. Сдано в набор 11/III 1974 г. Подписано к печати 30/X 1974 г. Формат 60×90¹/₁₆. Объем: 20 печ. л. Усл. п. л. 20. Уч.-изд. л. 21,8. Изд. № Стд — 161. Тираж 21 000 экз. Цена 92 коп.

План выпуска литературы издательства «Высшая школа» (вузы и техникумы) на 1975 г. Позиция № 15.

Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14. Издательство «Высшая школа»
Типография изд-ва «Уральский рабочий», Свердловск, пр. Ленина, 49. Заказ № 153